

Teemu Uimonen

KUNNONVALVONNAN HARJOITUSLAITTEISTON
SUUNNITTELU JA TOTEUTUS

Kone- ja tuotantotekniikan koulutusohjelma

2019

KUNNONVALVONNAN HARJOITUSLAITTEISTON SUUNNITTELU JA TOTEUTUS

Uimonen, Teemu
Satakunnan ammattikorkeakoulu
Kone- ja tuotantotekniikan koulutusohjelma
Kesäkuu 2019
Sivumäärä: 33
Liitteitä: 15

Asiasanat: Suunnittelu, kunnonvalvonta, värähtely, tasapainotus

Tämän opinnäytetyön tarkoituksena oli suunnitella laitteisto, jolla pystyttäisiin luomaan keinotekoisin keinoin erilaisia vikaantumisia toteutettuun laitteistoon ja joita kyettäisiin hyödyntämään kunnonvalvonnalle tärkeille asioille opetustarkoituksiin. Tämä opinnäytetyö tehtiin Rolls-Royce Oy Ab:lle.

Työssä esitellään toimeksiantajan yritys ja sen toimintaa. Tämän jälkeen käydään läpi kunnonvalvontaa, toteutetun laitteiston suunnittelua sekä mahdollistettuja laitteiston keinotekoisesti luotuja vikaantumisia.

TRAINING SYSTEM'S ENGINEERING AND IMPLEMENTATION FOR CONDITION MONITORING SYSTEM

Uimonen, Teemu

Satakunnan ammattikorkeakoulu, Satakunta University of Applied Sciences

Degree Programme in Machine and Production Engineering

June 2019

Number of pages: 33

Appendices: 15

Keywords: Design, condition monitoring system, vibration, balancing

The purpose of this thesis was to design a system, which can be used to create artificial faults in the built system, and which can be utilized for important aspects in condition monitoring for teaching purposes. This bachelor's thesis was commissioned to Rolls-Royce Oy.

This thesis introduces the company for which the thesis was done for. Afterwards the thesis goes into condition monitoring, the realized system's designing and the system's designed artificial faults.

SISÄLLYS

1	JOHDANTO	5
2	ROLLS-ROYCE OY AB	6
3	KUNNONVALVONTA.....	7
3.1	Kunnonvalvonta, sen edut ja sen rajoitteet	7
3.2	Kunnonvalvonnan menetelmiä	8
3.2.1	Kunnonvalvontaa värähtelyn kautta.....	9
3.2.2	Kunnonvalvontaa äänen kautta.....	10
3.2.3	Kunnonvalvonta infrapunalämpökuvauksen kautta.....	10
4	SUUNNITTELU	10
4.1	Laitteen esittely	11
4.2	Turvallinen käyttö	12
4.3	Värähtely	13
4.3.1	Ominaistaajuuksien määrittäminen.....	14
4.3.2	Vaimennus	15
4.4	Materiaalivalinnat	15
4.5	Toleranssit.....	16
4.6	Hammashihna ja hammaspyörät	16
4.7	Akselit.....	18
4.8	Epätasapainotus.....	18
4.9	Moottorin valinta.....	20
4.10	Kulmavaihte	20
4.11	Laitteiston taso	21
5	MAHDOLLISTETTUA JA LUOTUJA VIKATILOJA.....	23
5.1	Akselin taipuma	23
5.2	Epätasapainotus kulmavaihteeseen	27
5.3	Linjaus	28
5.4	Mekaaniset kiinnitykset.....	30
5.5	Laakeriviat	30
5.6	Hammaspyörät	31
5.7	Vaihteisto.....	31
5.8	Muut viat.....	32
6	YHTEENVETO JA POHDINTA	32
	LÄHTEET	33
	LIITTEET	

1 JOHDANTO

Tässä opinnäytetyössä suunnitellaan laitteistoa, jolla kyetään testaamaan ja mittaamaan erilaisia mekaanisista vioista johtuvia lieveilmiöitä kontrolloidusti opetus- ja esittelytarkoituksiin kunnonvalvontaan liittyen.

Tämä opinnäytetyö tehdään Rolls-Royce Oy Ab Rauman kunnonvalvonta osastolle. Luodulla laitteistolla mahdollistetaan laajemmat koulutus- ja harjoittelumahdollisuudet kunnonvalvontaan. Tällä laitteistolla on tarkoituksena mahdollistaa ja luoda erilaisten kunnonvalvonnan kannalta tärkeiden vikaantumisten tutkiminen, jotka johtuvat asennuksesta, viallisesta tai rikkoontuneesta komponentista.

Suunnittelun ja toteutuksen vikaantumiset ollaan rajoitettu mekaanisiin vikatiloihin koskien asennusta, komponentin kuntoa tai luomalla tiloja, jolla saadaan halutun kaltaisia tiloja, esimerkiksi dynaaminen epätasapaino.

Toteutetulla laitteella voidaan harjoitella ja todeta kunnonvalvontaan liittyviä virheitä ja niiden vaikutuksia mittaus ja tarkastelu tuloksiin. Tällä tarkoitetaan esimerkiksi, anturien käyttöä, tulosten analysointia, anturien viallisesta kiinnityksestä tai asennuksesta johtuvia tulosten muutoksia, tulosten vaihteluja kuorman tai mittausvirheiden takia. Käytännössä siis laitteiston tarkoitus on luoda käytännön kokemusta kunnonvalvontaan harjoittelun kautta.

2 ROLLS-ROYCE OY AB

Rolls-Royce on alkuperäisesti Henry Roycen ja Charles Rolls'n yhteistyöstä vuonna 1904 alkunsa saava yhtiö. Yhtiö sai alkunsa, kun kyseinen parivaljakko onnistui valmistamaan niin laadukkaan auton, että he päättivät perustaa sen pohjalta yrityksen. Myöhemmin yhtiö siirtyi myös lentokonemoottoreiden, voimansiirtojärjestelmien ja eri merenkulkulaitteistojen tuotantoon.

Suomessa Rolls-Royce Oy Ab:lla toiminta Raumalla ja Kokkolassa keskittyi meriteollisuuden laitteiden suunnitteluun, myyntiin ja valmistukseen. Rolls-Royce Oy Ab toimi suurena maailmanlaajuisena ohjailupotkurilaitteiden, kansikoneiden ja vesisuihkulaitteiden toimittajana.

Rauman yksikön tuotanto-ohjelmaan kuuluu osaksi ankkurointi-, kiinnitys- ja hinausjärjestelmät sekä propulsiolaitteet. Raumalla suunnitellaan ja valmistetaan Azimuth thrusters-propulsiolaitteita. Nämä ovat potkurilaitteistoja, joilla on mahdollistettu kääntyminen 360° kulmassa pysty akselinsa ympäri. Potkurilaitteistoja tarvitaan aluksissa, joihin tarvitaan hyvää ohjailtavuutta ja näitä voidaan käyttää myös esimerkiksi pitämään öljynporaustaluttoja paikoillaan. Rauman osastolla tapahtuu suunnittelu, tuotanto, markkinointi ja myynti.

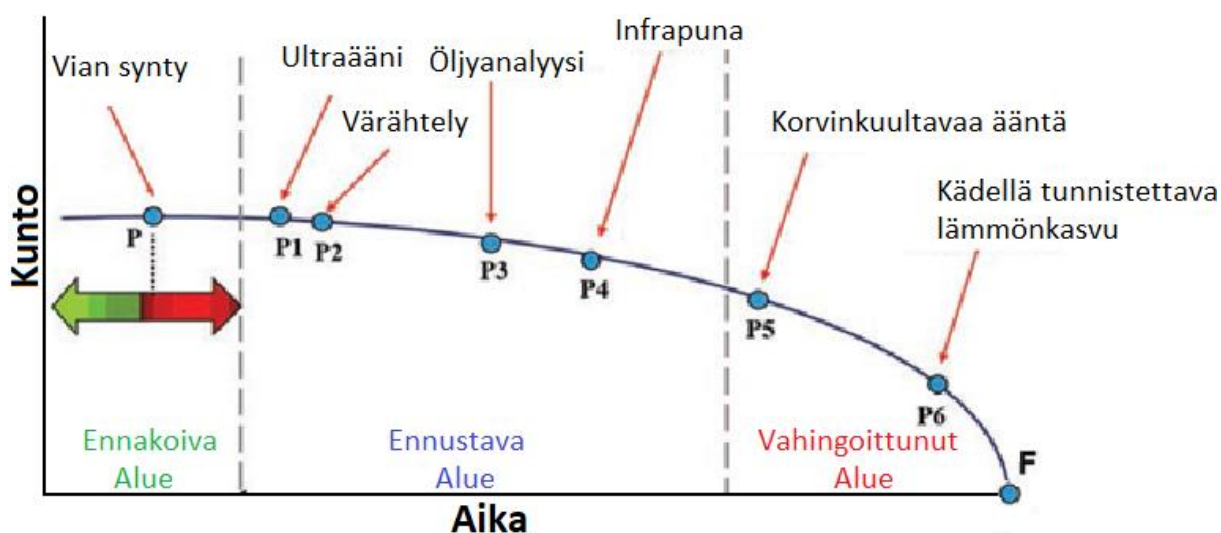
Suomessa toiminnan voidaan sanoa alkaneen Hollmingista ja Rauma-Repolan kansikoneryhmästä, jotka yhdistyivät vuonna 1988 luoden yrityksen Aquamaster Rauma Oy. Vuonna 1995 Vickers osti Aquamaster Rauman, jolloin heidät tunnettiin Kanewaryhmänä. Vuonna 1999 Rolls-Royce osti Vickersin ja silloin myös perustettiin meriteollisuusryhmä, Rolls-Royce Marine. Vuonna 2018 Rolls-Royce sopi Norjalaisen Konsbergin kanssa kaupasta heidän meriteollisuusryhmästä ja kauppa tästä hyväksyttiin vuonna 2019.

3 KUNNONVALVONTA

Kunnonvalvonnalla tarkoitetaan toimivan laitteiston kunnan arviointia. Arviointi tapahtuu tyypillisesti ihmisen aistinvaraisesti ja lisäksi käyttämällä eri laitteita määrittelemään ja kertomaan laitteiston kunnosta. Tarkoituksena on usein pidentää laitteiston tai järjestelmän käyttöä saamalla tietoa sen kunnosta, jolla mahdollistaa tarpeelliset toimenpiteet tarpeeksi ajoissa, ennen ongelmien tai vikaantumisten eskaloitumista. (SKF:n www-sivut)

3.1 Kunnonvalvonta, sen edut ja sen rajoitteet

Kunnonvalvonta on tärkeä osa laitteiden kunnossapitoa. Seuraamalla koneita ja niiden kuntoa, voidaan myös ennakoida niihin tulevia vikoja. Kunnonvalvonta ei kuitenkaan ole aina täysin luotettava, sillä tehokaskaan valvonta ei poista vikoja vaan ainoastaan pystyy ilmoittamaan niistä. Pahimmillaan vikaantumiset ja niiden lieveilmiöt voivat eskaloitua koko yritystä koskettaviksi, joiden takia on mahdollista, että normaali toiminta täytyy keskeyttää korjausten tai muiden lieveilmiöiden takia. Tieto vikaantumisista ja niihin puuttuminen mahdollistaa korjaukset ja toimien aloittamisen ennen vaurion tai vahinkojen eskaloitumista.



Kuva 1: Esimerkki I-P-F-käyrästä, laitteen kunnosta suhteutettuna aikaan, sekä kunnonvalvonnan menetelmiä tarkastella kuntoa. (Messer, A. 2017, muokattu)

Kunnonvalvonnasta huolimatta koneet vikaantuvat edelleen ja tästä syystä sillä ei poisteta kunnossapidon tarvetta. Koneita on järkevää valvoa sopivalla tekniikalla kohteeseen sopivin aikavälein, jotta viat saadaan kiinni riittävän ajoissa asianmukaisten toimenpiteiden suorittamiseksi. (Opetushallituksen www-sivut)

Kunnonvalvontaa harjoittamalla saavutetaan seuraavia etuja: Kustannussäästöt, turvallisuuden kohentaminen, päästöjen vähentäminen, tehostaa käyttöä, nostaa laadun tasoa ja saatua dataa voidaan käyttää tuotekehityksessä, sekä takuuasioissa. (Opetushallituksen www-sivut)

Kunnonvalvonta ei ole koskaan täysin varmaa ja täyttä varmuutta ei saada siitäkään, saataisiinko koneen elinikää kasvatettua, sillä kunnonvalvonta ei poista esimerkiksi nopeaa vaurioitumista. Kunnonvalvonta vaatii eri resursseja ja taloudellisia investointeja, sillä laitteistoon, henkilöstöön ja koulutukseen joudutaan panostamaan. On siis järkevää mitoittaa asiat, joihin on tärkeää sitoa kunnonvalvontaa ja missä käyttää esimerkiksi pelkkää korjaavaa kunnossapitoa, eli laitteiden käyttöä niiden vikaantumiseen saakka.

3.2 Kunnonvalvonnan menetelmiä

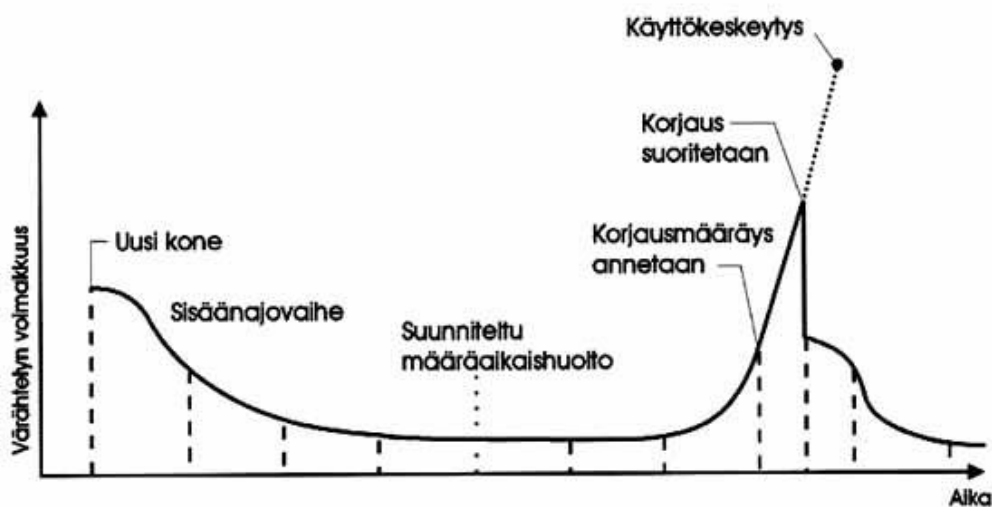
Kunnonvalvontaa voidaan ja harjoitetaan aistinvaraisesti. Nykypäivänä on kuitenkin tyypillistä käyttää siihen sen lisäksi eri teknisiä laitteita. Kunnonvalvonnassa käytetään nykyisin monia eri tapoja ja yleisiä niistä on värähtelymittaukset, lämpökameralla tarkastelu, hyötysuhdemittaukset, akustinen-, öljyn-, voiteluaineiden-, kulumishiukkas- ja virta-analyysit. Eri teknologiat kertovat eri asioita koneen kunnosta ja eri tekniikat soveltuvat paremmin tiettyihin tarkoituksiin. Kun käytetään sopivinta tekniikkaa, saadaan myös parhaat mittaustulokset ja parhailla tuloksilla mahdollistetaan paras kunnonvalvonta. (Opetushallituksen www-sivut)

On tärkeää ymmärtää ja oppia oikeaoppinen käyttötapa eri antureille ja oppia tulkitsemaan niiden antamia tuloksia. On ymmärrettävä anturin ja eri kunnonvalvontamenetelmien tarpeet ja rajoitukset. On pyrittävä siihen, että asennuksesta, käytöstä tai muista häiriöistä johtuvaa dataa ei tulkita väärin.

3.2.1 Kunnonvalvontaa värähtelyn kautta

Keräämällä värähtelydataa ja yleisesti harjoittamalla kunnonvalvontaa voidaan vioista saada varhaisessa vaiheessa tieto ja näiden ympärille voidaan suunnitella kunnossapito-ohjelma ja näin välttyä suuriltakin vahingoilta tai muilta seuraamuksilta, joiden takia pitäisi toiminta keskeyttää.

Värähtelydataa hyväksikäyttäen voidaan päätellä ongelman luonne ja vakavuus. Kun dataa hyväksikäytetään tuotekehityksessä, voidaan päätellä syy ongelman syntyyn ja näin kehittää tuotetta, jotta kestävyyttä tai käytettävyyttä voidaan kehittää. Saaduilla tiedoilla voidaan tehostaa toimintaa ja laitteistoa, jotta ongelmilta välttyttäisiin tulevaisuudessa. Samoin on mahdollista kasvattaa koneen käyttöikä, sekä käyttää saatua dataa kehittämään tuotantoa tai laitetta paremmin sille tarkoitettuun käyttökohteeseen. (Opetushallituksen www-sivut)



Kuva 2: Ennakoivan kunnossapidon toteutusperiaate. Esimerkkitapauksena laakerin värähtelyn voimakkuuden mittaus. (Opetushallituksen www-sivut)

Värähtelymittauksilla voidaan ottaa selvää ongelman vakavuudesta ja luonteesta. Värähtelyllä voidaan esimerkiksi ottaa selvää, onko kyseessä laakerivika, linjausvirhe, epätasapainoa tai esimerkiksi onko kyseessä ns. pehmyt jalka, eli laitteen jalat eivät kosketa runkoa tasaisesti tai ne eivät ole keskenään samassa tasossa. Värähtely onkin yksi parhaita tapoja ja keinoja kunnonvalvonnassa. Tyypillisesti värähtelymittaukseen käytetään kiihtyvyy-, nopeus- ja siirtymäantureita.

3.2.2 Kunnonvalvontaa äänen kautta

Akustinen emissio, eli äänen vuoto on hyvä työkalu yleisesti ilmavuotojen, voiteluongelmien, sähköisten vikojen ja myös laakerivikojen havaintoon. Kunnonvalvonnassa käytetään ultraäänen tutkimista, joka tarkoittaa siis yli ihmisen kuuloalueen olevaa ääntä, yli 20,000 Hz:ssä. Ultraääni on hyvä kunnonvalvontamenetelmä, eivätkä tämän tekniikan laitteet ole erityisen hankalia käyttää tai yleisesti kalliita investointeja. Ultraääni soveltuu kertomaan ongelmista hyvin varhaisessa vaiheessa. (Messer, A. 2017)

3.2.3 Kunnonvalvonta infrapunälämpökuvauksen kautta

Lämpökuvauksella muunnetaan infrapunasaiteily kuvaksi, usein mittaamaan lämmön intensiteettiä eri värein. Lämpö kykenee kertomaan meille vikaantumisesta, vaikka se ei ole täysin aukoton menetelmä, sillä lämmönmuutokselle syitä voi olla monia. Lämpökuvauksella on monia käyttökohteita, mutta tähän opinnäytetyöhön sitä voidaan soveltaa esimerkiksi laakereihin luotujen vikojen tarkasteluun.

Rajoitteena lämpökuvaukselle onkin, että se ilmaisee meille sen lämpötilan mikä heijastuu kappaleen pinnalta. Mikäli lämpökuvasta haluttaisiin soveltaa toteutetussa laitteistossa, se vaatisi muutosta laakeripesiin, sillä nykyisellään näkökontaktia ei saada laakereihin ilman rakenteellisia muutoksia.

4 SUUNNITTELU

Suunnittelun ensisijaisena tavoitteena on ollut pitää käyttö turvallisena ja mahdollistaa halutun kaltaiset vikatilat. Laitteiston suunnittelun ideoinnissa tutkittiin muita laitteistoja, joita käytetään samankaltaisissa tarkoituksissa. Laitteistosta tehtiin alustavia eri luonnoksia, kunnes päästiin lopulliseen tulokseen. Aluksi rakennelmaa suunniteltiin toteutettavaksi alumiiniprofiilista koostuvaksi rakenteeksi, mutta siitä luovuttiin, koska katsottiin järkeväksi käyttää olemassa olevaa tasoa, johon oli mahdollista rakentaa laitteiston toteutus. Olemassa olevan tason käyttö ei ollut täysin ongelmaton, sillä

alustavilla testeillä ja lasermittauksilla huomattiin ylimääräisen suuren kuormituksen vaikuttavan tason rakenteeseen. Tästä johtuen taso vaati ylimääräistä tuentaa, jonka jälkeen tason kuormitettavuus saatiin siedettävällä tasolle.

4.1 Laitteen esittely

Toteutettu laitteisto näkyy kuvassa 3 ja sen osaluettelot löytyvät liitteistä 1, 12 ja 13. Käyttöohjeet löytyvät liitteestä 14. Osaluetteloiden ulkopuolelle on jätetty rakenteesta pois sen kiinnityspultit ja mutterit. Kiinnityskohdat näkyvät liitteessä 9.

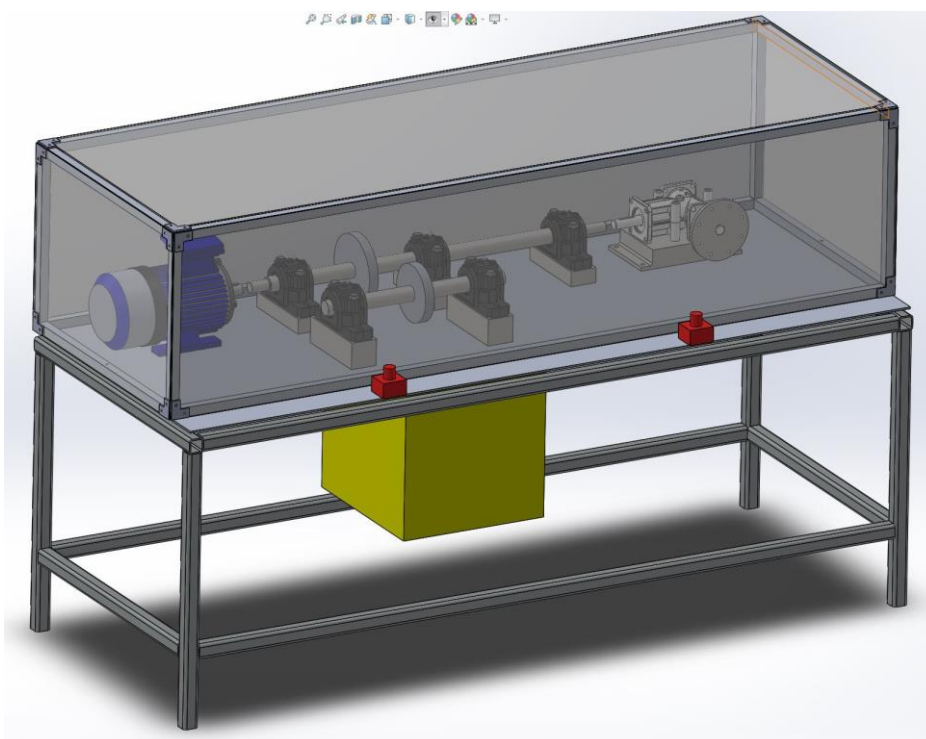


Kuva 3: Laitteisto ilman suojakupua

Laitteiston käyttö onnistuu pöydän alta löytyvän ohjauksotelon kannessa olevista painikkeista ja pöydän päällä olevista hätä-seis-painikkeista, joilla ohjataan moottorin käynnistystä ja nopeutta. Tarkemmat käyttöohjeet löytyvät Liite 14:sta.

4.2 Turvallinen käyttö

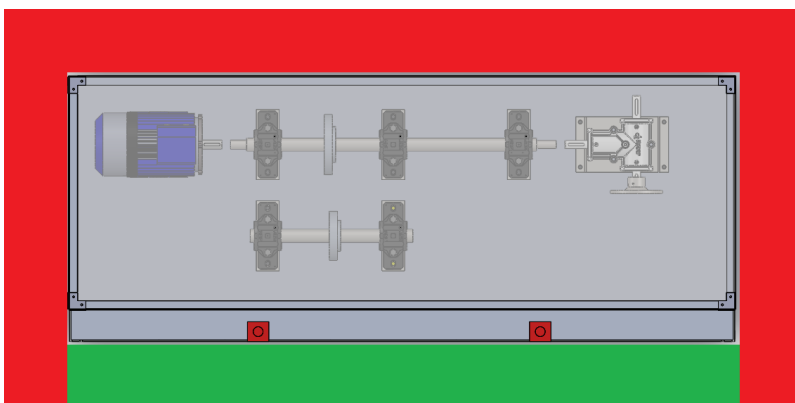
Laitteiston suunnittelu lähti siitä, että sitä olisi turvallista käyttää. Suunnittelussa ideointiin Kuva 4:n kaltaista 'akvaario'-mallia. Tämä suojakupu voitaisiin tarvittaessa poistaa kokonaisuena ja asentaa paikalleen pienellä vaivalla. Kuvun kiinnitys ideointiin tapahtuvan suoraan sen rungosta pöytään, esimerkiksi pultein ja mutterein. Näin se on helppo kiinnittää ja irrottaa tarpeen niin vaatiessa. Ideana oli käyttää alumiiniprofiilia rungon valmistukseen, peittää se sivuilta ja ylhäältä läpinäkyvällä akryylilevyllä ja hoitaa rakenteen kiinnitys esimerkiksi kulmarauodoilla kuvan 4:n osoittamalla tavalla jokaisesta kulmasta. Tarkempia kuvia ei tehty rakenteen ollessa tarpeeksi yksinkertainen. 'Akvaarion' toteutus jäi keskeneräiseksi.



Kuva 4: Idea laitteistolle asetettavasta 'akvaariosta', eli suojakuvusta. (SolidWorks, 2017)

Laitteiston käyttö on suunniteltu siten, ettei laitteiston kanssa saa olla minkäänlaisessa kosketuksessa sen käytön aikana, sekä oleskelu sen läheisyydessä on rajattava Kuva 5:n mukaisesti virran ollessa päällä.

Kuvassa 5 punainen väri merkitsee aluetta, jossa ei saa oleskella ja vihreä alue merkitsee käyttöaluetta. Käyttö ollaan suunniteltu käytännössä siten, että ainoastaan alueilla, joista käyttäjä tai katsoja ylettää helposti hätä-seis-painikkeelle voi oleskella. Vaikka toteutuksessa ei ole vielä suojauskupua, olisi sellainen oltava käytön aikana suojaamassa käyttäjiä mahdollisilta onnettomuuksilta.



Kuva 5: Käyttöalueen rajaus, josta ylettää hätä-seis-painikkeelle. (SolidWorks, 2017)

4.3 Värähtely

Tavanomaisia syitä värähtelylle on yleensä epätasapaino, linjaus- tai muut asennusvirheet ja vahingoittuneet osat tai sen komponentit. Värähtely ei ole normaalisti toivottavaa ja se on melkein aina haitallista laitteistolle, koska se asettaa ja synnyttää ylimääräisen kuorman ja rasituksen sen käytölle. Kuitenkin jotkut laitteet voivat käyttää tätä värähtelyä hyväkseen, esimerkiksi akustiikassa tai lämmöntuottoon värähtelyn kautta ultraäänihitsissä.

Tässä työssä tarkasteltiin koneen vikaantumutta ja normaalia käyntiä, sekä sille tehtiin aistivarainen tarkastelu. Tässä tarkastelussa todettiin moottorista siirtyvää ja mahdollisesti sen lisäksi virheellisestä asennuksesta syntyvää kevyttä värähtelyä pöydän tasoon, jota ei kuitenkaan ehditty työn toteutuksen aikana mittaamaan teknisin laittein ja toteamaan onko se liiallista.

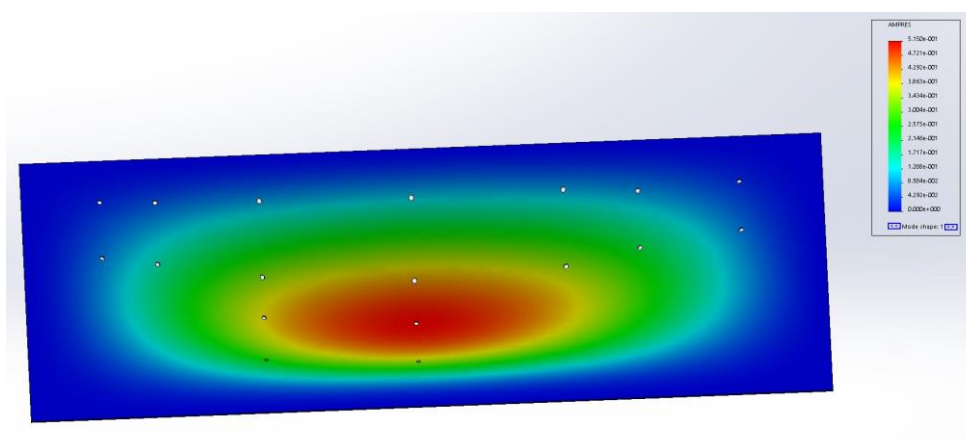
Käytännössä tässä opinnäytetyössä luotujen vikaantumisten ympärille on hyödyllistä saada aikaiseksi värähtelyä, koska vikaantumisia ja virhetiloja käytetään opetustarkoi-

tuksiin mittaustilanteissa. Eli on tärkeää pystyä luomaan esimerkiksi linjaus- tai kulmavirhe, joka taas aiheuttaa omat lieveilmiöt. Tämä ei kuitenkaan tarkoita, että moottorista, tai huonosta asennuksesta johtuva värähtely on toivottava ominaisuus sen levitessä, vaan sitä kuuluu vaimentaa eri keinoin, jos teknisin keinoin saadut mittaustulokset kertovan sen olevan liiallista.

4.3.1 Ominaisaajuuksien määrittäminen

Kaikilla rakenteilla on useita ominaisvärähtelytaajuuksia. Tällä tarkoitetaan tilaa, jossa rakenne ottaa parhaiten energiaa vastaan ja alkaa luonnollisesti värähdellä. Ilmiö, jossa toisesta rakenteesta tai ympäristöstä siirtyy energiaa sen ominaisvärähtelytaajuudella kutsutaan resonoinniksi. (Otavan opiston www-sivut)

Ominaisaajuuksien selvittämiseksi ollaan tässä opinnäytetyössä käytetty hyväksi SolidWorks simulointityökalua ja niiden tulokset löytyvät liitteistä 15. On tärkeää pyrkiä siihen, ettei suunnitellessa ominaisaajuus tai resonointi aiheuttaisi rakenteelle ylimääräistä kuormitusta tai lieveilmiöitä. Tässä työssä ollaan käytetty taajuusmuuntajaa ja siinä potentiometriä, jolla pystytään ohjaamaan taajuusmuuttajan kautta kierrosnopeutta. Koska moottorin tuottama ja siirtämä värähtely, sekä dynaamisen epätasapainon tuottama värähtely ovat kumpikin riippuvaisia kierrosnopeudesta, niin katsotaan ominaisaajuuden tuottamien ongelmien olevan helposti vältettävissä.



Kuva 6: Käytetty alumiinilevy reagoi rummun tavoin siihen iskiessä sen ominaisaajuus. Simulointimallissa kiinnitykset ovat levyn reunoilla. (SolidWorks, 2017)

4.3.2 Vaimennus

Värähtelyä on mahdollista vaimentaa. Muuttamalla värähtelevän työn luonnetta, voidaan sitä vaimentaa tai käytännössä vähentää halutuissa paikoissa. Esimerkiksi aiheuttamalla kitkaa liitosten tai massan muodossa, voidaan muuttaa värähtelyn tekemä työ rakenteen kannalta negatiiviseksi ja näin kohdistaa se siten, kuin katsotaan sen olevan vähemmän haitallista tai harmitonta rakenteen kannalta. (Helsingin yliopiston www-sivut)

Käytännössä haitallista värähtelyä syntyy moottorin käytöstä ja yleisesti muista vikatiloista. Tapoja, joilla tässä työssä haluttiin soveltaa vaimennusta, oli käyttämällä pulttiliitoksia, muuttamalla värähtelyn tuottama liike-energia kitkaksi, koska kun kohdistettu jännitys kasvaa, niin kasvaa myös vaimennus. Muita keinoja olisi ollut käyttää esimerkiksi liimaliitoksia tai muuttaa rakennetta. Tässä työssä kuitenkin katsottiin, että vaimennuksen tarve on suhteellisen pientä ja värähtelyn synty on kaikista käytännöllisintä vaimentaa pulttiliitoksilla ja lisätä niiden määrää sen mukaan, jos se katsotaan tarpeelliseksi. Halutuista vikatiloista syntyvää värähtelyä ei ole syytä lähteä vaimentamaan, koska niiden lieveilmiöitä halutaan tutkia ja mittaamista harjoitella. (Hentinen, M., Hynnä, P., Lahti, T., Nevala, K., Vähänikkilä, A., Järviluoma, M. 2002, 34-37)

4.4 Materiaalivalinnat

Tässä työssä käytettiin materiaalivalinnoissa kriteereinä, että ne saavuttavat halutut tavoitteet, sekä tietenkin taloudellisia kustannuksia.

Pääsääntöisesti runko-, ja rakennemateriaalissa pidättäydyttiin alumiinin ja teräksen välillä, siten kuin niihin voitiin vaikuttaa. Alumiini on helpompi työstää ja toisaalta se on myös omaa kevyemmän tiheyden ja näin painaa vähemmän kuin mikään teräs. Riippuen käyttökohteesta tai tarkoituksesta tämä voi olla hyödyksi tai haitaksi suunnittelussa. Materiaalit poikkeavat myös teknisiltä ominaisuuksiltaan ja kokonaisuudessa on usein hankala päättää teknisesti parhaan valinnan puolesta, koska taloudelliset kustannukset painavat niin paljon.

Tällä laitteistolla suoritetaan eri vikatiloja ja ylimääräinen massa nähtiin paikoittain etuna, kun tämä saatiin keskitettyä joihinkin tiettyihin kohtiin, kuten laakeripukkien alle oleviin alustoille ja laitteistolle itselleen. Tämä vähentää tai poistaa tarpeen ylimääräisten kiinnitysten suhteen ja kasvattaessaan alustan massaa pystytään vaimentamaan pöytään ja laitteeseen kohdistuvia lieveilmiöitä. Yhtenä huolena pidettiin pöydän ja lattian välille syntyvää tärinää ja koska pöydän pulttaaminen ei ollut vaihtoehto, nähtiin ratkaisu massan kasvattamisena.

4.5 Toleranssit

Eri laitteet ja komponentit vaativat sovituksen tietyn toleranssin, jotta niitä voidaan käyttää tehokkaasti ja suunnitellun mukaisesti. Tässä työssä pidettiin tärkeänä, että asennus voidaan suorittaa ilman lämpökäsittelyä ja että se voidaan suorittaa mahdollisimman helposti. Tällöin pitää käyttää välyksellistä asennusta, eli akselin halkaisijan on oltava pienempi kuin reiän, johon se asennetaan.

Suurella kirjaimella viitataan porauksen toleranssiin ja pienellä kirjaimella taas akselin toleranssiin. Käytettyjen laitteiden kiinnityksissä päädyttiin kartioholkkien ja kiristysholkkien käyttöön, joiden käyttö edellyttää akselilta tietyn toleranssin, sikäli halutaan asennuksesta tietynkaltainen ja tässä tapauksessa välyksellinen. Kiristysholkkien työstö on tehty JS9 toleranssilla ja niihin suositellaan h9 toleranssia akselilta valmistajan ja jälleenmyyjän tietojen mukaisesti. Käytetyt toleranssit vaihtelivat H7-H9 välillä, riippuen esimerkiksi kartioholkkien kokoluokasta ja tyyppistä. Käytetyt komponentit suosivat h7-h9 toleranssia akselilta.

4.6 Hammashihna ja hammaspyörät

Laitteistossa käytetään hammaspyöräparia, jossa on suora hammastus ja hammashihnaa voimansiirtoon. Suunnittelussa on kuitenkin mahdollistettu muutokset, jos niitä halutaan tehdä, joten vaihto erikokoiseen hihnaan, pyörään tai tyyppiin on melko helppoa, sillä toisella akseleista on asennuksessa liikkumavara.

Etäisyys akseleiden keskeltä lasketaan hammaspyörien, sekä hammashihnan koon perusteella, kaavan (1) mukaisesti.

$$L = \frac{l}{4} - \frac{\pi}{8} * (D + d) + \sqrt{\left(\frac{l}{4} - \frac{\pi}{8} * (D - d)\right)^2 - \frac{1}{8} * (D - d)^2} \quad (1)$$

Jossa:

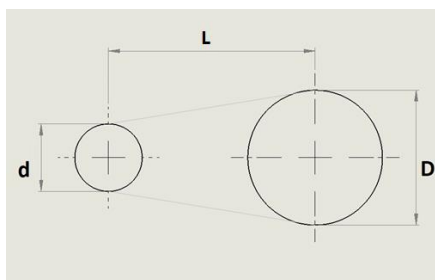
L = Akseliväli (mm)

D = Suuremman hammaspyörän halkaisija (mm)

d = Pienemmän hammaspyörän halkaisija (mm)

l = Hammashihnan pituus (mm)

(OEM www-sivut, 2013)



Kuva 7: Kaavan (1) arvot. (SolidWorks, 2017)

Kaavalla (1) välimatkaksi saatiin 323,39mm ja josta täytyy poistaa vielä kummankin akselin säde, jos halutaan mitata etäisyys akseleiden reunasta toisiinsa. Käytetty kaava ei ole täysin eksakti, mutta kuitenkin riittää millin kymmenyksen tarkkuuteen ja näin sen katsotaan olevan sovellettavissa tähän.

Hammaspyörien suhdeluku, eli siis niiden nopeus voidaan laskea helposti pyörien hampaiden lukumäärästä. Kun ajavassa renkaassa on suurempi hammasluku, se hidastaa pyörivän liikkeen nopeutta. Koska voimavälitys tapahtuu samalla moottorilla, niin momentti, eli kyky tehdä pyörivää liikettä tässä tapauksessa kasvaa.

4.7 Akselit

Laitteistossa käytettiin kahta akselia, joista toinen pyörii suoraan moottorin kautta ja toinen hihnan välityksellä. Pienempi akseli, joka kulkee hihnan välityksellä, on suunniteltu siten, että siinä on kaksi tervettä laakeria, eikä siihen kohdistu muita vaikuttavia tekijöitä, kuin hihnavälityksen välittämät voimat. Pitempi akseli ollaan suunniteltu siten, että siinä on kolme eri tavoin vahingoittunutta laakeria. Päätös käyttää kolmea laakeria syntyi tarpeesta saada kontrolloitava kuormitus laakereille. Ideana oli linjata akseli kahden laakerin perusteella ja näiden kiinnitysten jälkeen asentaa kolmas, jonka epätäydellinen asennus siirtäisi vaikuttavat voimat laakereiden kuormitukselle. Koska on mahdollista käyttää, tai olla käyttämättä tätä kolmatta tukipistettä, ei pelätty kokeilla tämänkaltaista lähestymistapaa.

4.8 Epätasapainotus

Koska laitteeseen haluttiin tuottaa epätasapaino, lähestyttiin tätä vikaantumisen luomista kiekkomaisen muodon avulla, johon saataisiin kiinnitettyä pultteja ja joka saataisiin kiinnitettyä mahdollisimman yksinkertaisesti akseliin. Tätä varten mallinnettiin myös yksinkertainen laippa, josta pyydettiin tarjousta, mutta kuitenkin saatavilla olevat melkein identtiset tuotteet olivat niin paljon edullisempia ja näin päädyttiin valmistuotteeseen, Fenner BF20.

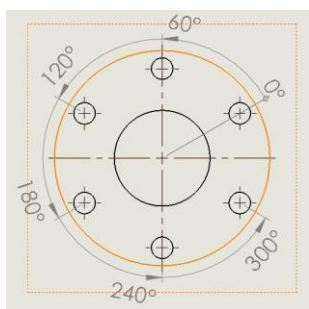


Kuva 8: BF-sarjan laippa ilman kartioholkkia

Laipasta löytyy kuusi M8 reikää, joihin tehtiin M10 kierteet. Reiät ovat tasaisesti, 60° kulmaan levitettyinä. Tarkoituksena on mahdollistaa M10 pultin kiinnitys kierteisiin ja lukitus mutterilla, jolla saadaan aiheutettua epätasapaino.

Pienet muutokset, kuten kuluminen tai yleinen likaantuminen, ovat riittäviä synnyttämään ja aiheuttamaan epätasapainoa. Syntyvän voiman määrään vaikuttaa epätasapainoa tuottavan massan suuruus, sen sijainti ja pyörimisnopeus.

Laippaan ja sen kiinnityksiin asetetut epätasapainoa tuottavat voimat on melko helppoa laskea pilkkomalla vaikuttavat voimat vektoreiksi ja laskea niiden resultantti, eli siis näiden varsinainen vaikuttava voima. Näiden kaikkien ollessa samalla etäisyydellä, sekä symmetrisellä jaolla eri kulmissa, on resultantti melko ongelmattomasti laskea geometrian avulla.



Kuva 9: Toteutuksen kiekon kiinnityspisteet (SolidWorks, 2017)

Kuvasta 9 käy ilmi kiinnityspisteet ja niiden jako. Siitä nähdään, että jako on tehty tasaisesti 60° :n kulmissa. Joten jos halutaan laskea vaikka kolmen pisteen vaikuttavien voimien resultantti, on muutettava niihin vaikuttavat voimat ensiksi vektoreiksi, eli katsoa yhden pisteen tekijät. Käytännössä tämä tarkoittaa kaavan (5) käyttöä jokaisen epätasapainon laskemiseen yksittäisenä voimana. Jos kuvitellaan kulmissa vaikuttavan eri voimat kohdissa F1, F2 ja F3 niin geometrialla voidaan laskea resultantti. Ensin valitaan alkukulmi, joka on esimerkiksi 0° , jonka jälkeen lasketaan voiman tekijät niiden omassa astekulmassa. Voima jaetaan komponentteihin kaavalla (2).

$$F_n = (|F_n|\cos(\alpha))i + (|F_n|\sin(\alpha))j \quad (2)$$

Voima jaetaan komponentteihin, eli i ja j muotoisiin vektoreihin kaavalla (2) ja jokaisen voiman i ja j summataan, jolla saadaan resultantti. Kun tiedetään kaikkien vektorien komponentit, on mahdollista laskea resultantti kaavalla (3).

$$|R| = \sqrt{(i)^2 + (j)^2} \quad (3)$$

4.9 Moottorin valinta

Valitun moottorin kriteereissä piti saavuttaa 1000-1500 rpm kierrosnopeus, sekä sen piti pystyä ongelmitta suoriutua kaikesta kuormasta, joka sille asetetaan. Eivätkä taloudelliset kustannukset saisi olla liian korkeita.

Alustavasti katsottiin matalatehoisempia moottoreita, kuin nykyinen 2,2 kW moottori, mutta kuitenkin käytännössä kaikkien pienempien toimitusajat olivat liian pitkiä tai niiden kohdalla ylitettiin toteutukseen valitun moottorin kustannukset.

Koska moottorissa käytetään taajuusmuuttajaa, sen eristysluokituksen kuului olla F tai H luokkaa. Valittu moottori on F luokiteltu. F luokituksen moottori kestää 155 C asteen lämpötilan, mutta on kuitenkin järkevää rajata moottorin käyttölämpötila alle 100 C asteeseen sen eliniän pidentämiseksi. Käytännössä moottorin lämpötilan ei pitäisi kuitenkaan saavuttaa yli sallittua ylärajaa, koska käytössä kuormat ovat pieniä ja mitään tarvetta äkillisille nopeuden muutoksille ei ole.

Moottorin runkovalintana olisi ollut käytännöllisempää käyttää esimerkiksi valurautaa, eikä alumiinia. Valuraudan magneettisten ominaisuuksien vuoksi se on käytännön tasolta järkevämpi mittauskalustolle. Kuitenkin saadut tarjoukset puolsivat alumiinista moottoria huomattavasti enemmän, jolloin päädyttiin siihen.

Haittapuolena suurelle moottorikoolle on sen synnyttämä värähtely, joka siirtyy rakenteeseen ja jota saatetaan joutua vaimentamaan, sillä käytön aikana oli tunnistettavissa kevyttä värähtelyä pöydän tasolta.

4.10 Kulmavaihde

Kulmavaihteen valinnassa keskityttiin hintaan, muokattavuuteen sekä saatavuuteen. Käytännössä kuitenkin päättäväksi tekijäksi syntyi kulmavaihteen huollettavuus. Koska tarkoituksena oli aiheuttaa vikaa mm. kulmavaihteiden rattaissa tämä tarkoitti sitä, että niiden oli oltava vaihdettavissa ja niihin oli oltava saatavilla varaosia.

Kulmavaihteen ollessa ehjä käyttöä ei tarvitse rajata suunnitellun moottorin suunnalta, mutta sen maksimi aksiaalinen, eli akselin suuntainen kuormitus on 880 N ja säteis-kuormitus 490N, joka käytännössä tarkoittaa myöskin, ettei käyttöä tarvitse rajata. Tästä lisää kohdassa 5.1 ja 5.2.

4.11 Laitteiston taso

Laitteiston tasoa suunnitellessa ideoitiin montaa eri vaihtoehtoa. Alun perin ideointi oli lähtenyt alumiiniprofiilista koostuvasta rakenteesta ja lopulta päästiin pöydän päälle rakennettavaan laitteistoon. Tässä työssä nähtiin järkeväksi käyttää saatavilla olevia resursseja ja näin päädyttiin olemassa olevaan pöytään ja sen käyttöön.

Kuitenkaan ei tiedetty tarkkaan paljon kyseinen pöytä kestäisi kuormitusta ja kuitenkin alustavat testit osoittivat pöydän elävän riippuen sille asetetusta kuormituksen määrästä, jota tosin ylimääräinen tuenta korjasi suuresti. Asiaa koitettiin tutkia ja koska toimeksiantajalla oli vain rajallinen määrä jälleenmyyjiä, joiden kanssa he tekivät kauppaa kyseisen kaltaisten tuotteiden kanssa, oli melko helppo rajata vaihtoehdot 250 – 500 kg:n kuorman kestäviin pöytiin, joka siis on riittävä tälle laitteistolle. Suuri skaala johtuu siitä, että rajatut pöydät omasivat samat mittasuhteet ja esite kuvat. Asiaa ei tarkasteltu enempää, koska katsottiin nimellisen alarajan täyttävän vaatimukset kuorman suhteen.

Yleensä linjauksissa käytetään eri keinoja luomaan laitteistolle suora ja muuttumaton taso. Tässä työssä kuitenkin jouduttiin improvisoimaan tätä hieman. Dynaamisesta epätasapainosta johtuen syntyi tarve luoda tilanne, jossa pöydän muuttuva kuorma ei vaikuttaisi sen ominaisuuksiin. Kuitenkin alustavat testit, joissa siis luotiin eri keinojen avulla kuormitusta pöydälle kertoivat, että pöydän ylimääräisen tuennan lisäksi saateen joutua tekemään muitakin muutoksia, joihin kuului mahdollinen pöydän puukuitulevyn vaihtaminen jäykempään materiaaliin tai jonkinlaisen ylimääräisen tuennan jolla nyt rakennetun lisäksi tai tilalle.

Laitetta kasattaessa myös huomattiin pöydän reagoivan eri tavoin kuin alustavasti oltiin arvioitu laitteiston tuottamiin kuormituksiin. Pöytää tarkasteltiin laserilla ja mitaukset poikkesivat jonkin verran tarvitusta linjauksesta, jonka seurauksena olisi jouduttu käyttämään simmilevyjä suuremmissa määrin mitä oltiin arvioitu, tai tekemään joitain rakennemuutoksia suurimpien muutosten kohdalla. Tässä kohtaa päädyttiin tekemään pöytään rakennemuutoksia, rakentamalla laakeripukkien kohdalla neljästä iskumutterista koostuva neliö, jossa käytetään pultteja nostamaan levyn tasoa ja mutteireita lukitsemaan sitä pöydän alapäin katsottuna. Tässä katsottiin, että jos kyseinen rakenne ei toimi halutulla tavalla, siitä voidaan aina siirtyä aluslevyjen laajempaan käyttöön. Hienosäätö kuitenkin jätettiin vielä simmilevyille.

Puukuitulevyille tehtiin rasiustesti kiinnittämällä siihen iskumutteri, pultti ja pulttia vasaroimalla yritettiin arvioida pöydän kykyä suoriutua puristuskuormituksesta. Koska ei tiedetty varmuudeksi käytetyn puukuitulevyn ominaisuuksia, niin tätä oli melko hankalaa yrittää laskea tarkasti tai saada suuntaa antavia tuloksia pöydästä, sen puutteellisten tietojen vuoksi. Spekuloinnista saatavat tulokset olisivat todennäköisesti olleet harhaanvieviä, siksi käytännön testi nähtiin tarpeelliseksi ja järkevämmäksi.

Välilevyille, eli alumiinilevyille laskettiin leikkausjännitystä, jossa todettiin levyn kestävän kaavalla (4)

$$T_s > \frac{Q}{A} \quad (4)$$

Jossa:

T_s = Sallittu leikkausjännitys (N/mm²)

Q = Vaikuttavat leikkausvoimat (Kiinnitys, epätasapaino ja massa) (N)

A = Levyn pystyala, pulttien kokoisilta aloilta (mm²)

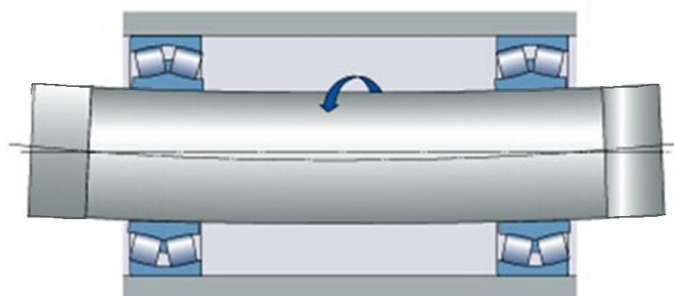
(Saarineva, J. 1995, 6-6.4)

5 MAHDOLLISTETTUA JA LUOTUJA VIKATILOJA

Tässä käydään läpi esimerkkeinä tyypillisiä ja mahdollistettuja vikaantumisia luotuun laitteistoon ja tapoja, kuinka ne on luotu. Kun kyetään tunnistamaan vian tyyppi tehokkaammin, saadaan myös kunnonvalvonnasta ja kunnossapidosta tehokkaampaa. Luomalla laitteisto, jossa kyetään yhdistelemään ja eristämään tietyn vikojen lieveilmiöt luodaan parempi pohja koulutukselle ja harjoittelulle kunnonvalvonnassa.

5.1 Akselin taipuma

Teräksiseen akseliin mahdollistettu taipuma on toteutuksessa melko pieni. Taipuman lisääminen vaatisi uuden akselin ja sille tarkoitetun epätasapainoa tuottavan osan, esimerkiksi BF20. Koska haluttuun tavoitteeseen ei päästy toteutuksessa, tässä kohdassa käsitellään suunnittelu, jolla siihen päästäisiin.



Kuva 10: Akselin taipuma ja tavoiteltu muodonmuutos. (SKF:n www-sivut, muokattu)

Epätasapainoa voi aiheuttaa moni asia. Likaantuminen, kuluminen, yleinen muoto, valun tai materiaalin laatu, jonka toimesta sen tiheys vaihtelee eri kohdista, joka luo epätasapainoa tuottavan voiman.

Jotta taipuma saadaan selville, on selvítettävä, mitkä voimat vaikuttavat siihen, käytetty materiaali ja sen ominaisuudet. Näiden asioiden summalla on mahdollista laskea ja arvioida näiden voimien vaikutus akselin muotoon.

Tässä työssä pyrittiin selvittämään akselin taipuman muodonmuutosta katsomalla minkälainen epätasapaino siihen vaikuttaa ja sen jälkeen laskea minkälaisen muodonmuutoksen tämä tekisi. Epätasapaino voidaan laskea käyttämällä kaavaa (5):

$$F = m * r * \omega^2 \quad (5)$$

Jossa:

F = Voima (N)

m = Massa (kg)

r = Säde (m)

ω = Nopeus (rad/s)

Eli voima vaikuttavalle epätasapainolle saadaan, kun käytetään massaa, sädettä ja nopeutta. Tietämällä dynaamiset vaikuttavat voimat, voidaan seuraavasta kaavasta johdtaa tarvittava voima tai tietyllä voimalla saatava taiputus kahden tukipisteen varassa olevalle akselille kaavalla (6)

$$y_{max} = \frac{1}{48} * \frac{F * L^3}{E * I} \quad (6)$$

Neliömomentin, I laskemiseen käytetään kaavaa (7):

$$I = \frac{\pi * d^4}{64} \quad (7)$$

Jossa:

y_{max} = Suurin taipuma (mm)

F = Vaikuttava voima (N)

E = Kimmokerroin (N/mm²)

I = Neliömomentti (mm⁴)

L = Tukipisteiden välinen matka (mm)

d = Akselin halkaisija

(Saarineva, J. 1995, 3.1.3.2.1, 5-5.4)

Kuitenkin jos haluttaisiin tuoda tämä muutos se vaatisi muutoksia pöydän rakenteseen. Yksi tapa lähestyä tätä olisi muokata kahta laakeripukin alustaa tai hankkia kokonaan uusi (Liite 6), korvata vanha akseli uudella (1000x20, alumiini, esimerkiksi EN AW-6082-T6), asettamalla akselin keskelle laippa (BF20) ja akselikytkimeen ja hihnapyörään uudet kartioholkit (2012-20, 1610-20). Tietenkin tämä tarkoittaisi myös

uuden laakeripukin (SNL 506-605) hankkimista, joka tarvitsisi uudet laakerit (1305 K), kiristysholkit (H305), tiivisteet (TSN 605 A tai C) ja lukkorengaat (FRB 7,5/62). Pöytään tarvitsisi tehdä kiinnityksiä varten pieni muutos, koska vanhan laakerin kiinnitykset olivat 170mm etäisyydellä toisistaan ja korvaavan mallin kiinnitykset taas ovat 150mm etäisyydellä toisistaan. Kiinnitys tehtäisiin edelleen M12 pultein ja reikä niitä varten olisi esimerkiksi 15mm halkaisijalla, asennuksen helpottamiseksi.

Käyttämällä kaavaa (5) saadaan laskettua, minkälainen voima saadaan tuotettua tietyllä massalla, kun synnytetään epätasapaino, eli tässä tapauksessa BF20 laipalla. Käyttämällä kaavaa (6) saadaan sen voiman aiheuttama taipuma selville. Tähän tietenkin vaikuttaa käytetyn akselin oma massa, sekä siihen asetetut kuormat staattisessa kuormituksessa. Akselin oma massa on helppo laskea, sillä jos käytetään tankomaista akselia, jonka tilavuus saadaan kaavalla (8):

$$V = \pi * r^2 * L \quad (8)$$

Jossa:

V = Tilavuus (cm³)

r = Säde (cm)

L = Pituus (cm)

Kun tiedetään tilavuus, voidaan myös laskea tiheyden avulla sen massa. Jos alumiinin tiheys on 2,7g/cm³, niin kaavaa (8) kertomalla tiheyden kanssa saadaan laskettua akselin paino, joka on noin 850g. Tähän tulisi lisäksi BF20, jonka paino on n. <1856g, sekä siihen asetettavat eri painot, eli mutterit ja pultit. Ylimoitettussa esimerkkitilanteessa summana käytetään 294g edestä muttereita ja pultteja ja oletetaan käytettävän DIN933 ja DIN934 standardin mukaisia tuotteita. Nämä summaamalla voidaan laskea enimmäiskuormitus staattisessa tilanteessa, joka on n. 3 kg, tai n. 30 N. Jos asetetaan kaavan (6) mukaisesti kuormitus akselille ja pidetään tukipisteiden etäisyydet samoina, voidaan staattinen taipuma laskea.

$$y_{max} = \frac{1}{48} * \frac{30 \text{ N} * 700^3 \text{ mm}}{70,000 \text{ N/mm}^2 * 7853,98 \text{ mm}^4} = 0,39 \text{ mm}$$

Tästä nähdään, ettei käytännössä taipuma ole silmin havaittavissa. Tähän on kuitenkin huomioitava dynaaminen kuormitus näiden lisäksi. Tässä voidaan myös silmäillä suhteellisesti suurta kuormitusta, lasketaan se kaavalla (5)

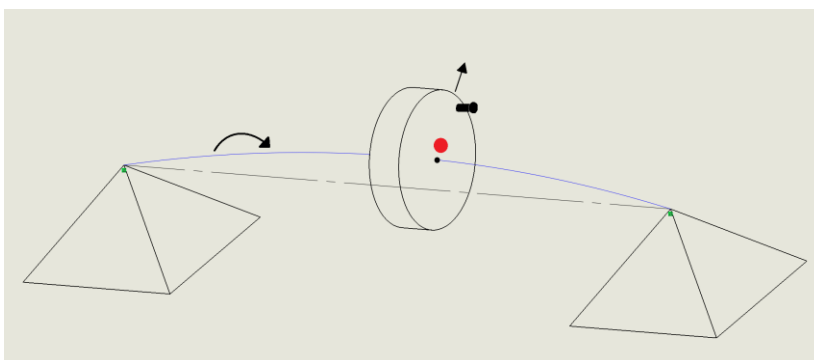
$$F = 0,294 \text{ kg} * 0,062 \text{ m} * \frac{146,61^2 \text{ rad}}{s} = 395 \text{ N}$$

Kun saadut voimat yhdistetään ja asetetaan uudelleen kaavaan (6) saadaan taipumaksi 5,6mm, joka käytännössä tarkoittaa akselin materiaalivalinnasta riippuen pysyvää muodonmuutosta. Käytännössä kuitenkin vaikuttavien voimien resultantti on pienempi, kuin pelkästään summattuna. Vertailun vuoksi DIN933 M10x150 pultti painaa 86,4g ja DIN934 mutteri 11,6g, sekä BF20:ssa pulttien paikat ovat jaettu kuuteen 60° kulmassa oleviin M10 kierteillä oleviin kiinnityksiin, joten kolmen M10x150 ja mutterin yhteisvoimat saisivat 5,6mm taipuman niiden ollessa yhtä aikaa samassa pisteessä ja akselin pyöriessä 1400 rpm. Jakamalla voimat vektoreiksi ja laskemalla vektorien resultantti saataisiin laskettua todellinen voima kaavoilla (2) ja (3), joka on siis alle pelkästään summatun verran. Kuitenkin koska kyse on vain havainnollistavasta esimerkistä, se nähdään tarpeettomaksi.

Käytännössä kuitenkin, koska kuormitus muuttuu epätasapainoa laskiessa suhteessa nopeuteen, olisi jokainen eri kuormitus laskettava tietyille nopeuksille, jotta ei aiheuteta pysyvää muodonmuutosta. Näin on helpompi vain rajata suunnittelussa käyttö tietyille muttereiden ja pulttien yhteiselle kuormalle, joka on yhden M10x40 ja M10 mutterin verran, eli 43g, joka asetetaan yhteen BF20:n laipan kiinnityspisteeseen. Tällä saavutetaan n.1,3mm taipuma 1400 rpm nopeudella, johon siis on huomioitu akselin ja BF20:n oma paino, sekä mutterin ja pultin epätasapainosta syntyvä voima. Tämän lisäksi on huomioitava muita tekijöitä, kuten käytetäänkö kartioholkin kanssa kiilaa ja onko siinä kiilauraa? Laskettu epätasapaino kiilaa käyttämättä jättämisestä kuitenkin pysyttelee samassa, n. 1,3mm muodonmuutoksessa. Kiilaa käyttämättä oleminen tuottaa n. 3 – 6 N voiman dynaamisessa epätasapainossa enimmillään ja siihen vaikuttaa kierrosnopeus ja käyttämättä jätetyn kiilan koko ja akselin tai kiilan materiaali.

Kuitenkin aikaisempi laskutapa on epätäydellinen. Aikaisemmin mainitulla laskutavoilla yhdistetään liikkeestä syntyvän epätasapainon voima, sekä voimien synnyttämä

muodonmuutos. Mitä tässä laskutavassa ei lasketa on voimien summasta ja muodonmuutoksesta johtuva massakeskipisteen muutosta. Tällä tarkoitetaan kuva 12:ssä näkyvää muodonmuutosta ja siirtymää. Katkoviivalla kuvataan muodoltaan muuttumattoman akselin pyörimisrataa, sekä yhtenäisellä sinisellä viivalla tarkoitetaan muodonmuutoksesta johtuvaa pyörimisrataa. Kuvassa on myös nähtävillä kaksi pistettä, joista nähdään punainen massakeskipiste ja sen liikkuminen pois mustasta geometrisesta keskipisteestä epätasapainon ja muodonmuutoksen takia.



Kuva 12: Epätasapainosta ja kuormituksesta johtuva akselin muodonmuutos ja keskimassapisteen siirtymä. (SolidWorks 2017)

Rajaus alhaiseen voimaan tehdään lähinnä kapean akselin, sekä pöydän rakenteen vuoksi. Kun pöydän muotoa tarkkailtiin laser linjauksessa, huomattiin erikokoisten kuormitusten vaikuttavan pöydän rakenteeseen. On siis järkevää käyttää kuormaa, jonka synnyttämän voiman vuoksi pöydän rakenne pysyy mahdollisimman paljon samana.

5.2 Epätasapainotus kulmavaihteeseen

Toteutuksessa käytettiin BF20 laippaa, josta löytyy kuusi M8 reikää 62,5mm säteen etäisyydellä sen keskustasta. Tekemällä näihin reikiin M10 kierteet voidaan tähän laippaan kiinnittää pultteja helposti, joilla voidaan luoda epätasapaino. Kiinnittämällä näihin kierteisiin pultteja ja muttereita, saadaan luotua epätasapaino, jonka synnyttämä voima voimistuu suhteessa sen nopeuteen ja etäisyyteen. Käytetyssä kulmavaihteessa on kuitenkin rajoituksia, koska siihen ei saa kohdistaa kuin 490N säteiskuormitusta ja akselin suuntaisesti 880N edestä voimaa.

Käytetystä moottorista on mahdollista saada n. 1400 rpm kierrosnopeus ja koska toteutukseen otettiin 1:2 kulmavaihte ja toteutus tehtiin siten, että kulmavaihteen ulostulo hidastuu, on käytetyn laipan kierrosnopeus enimmillään n.700 rpm kierrosnopeus tai n.74 radiaania sekunnissa.

Soveltamalla kaavaa (5) saadaan laskettua enimmäiskuorman määrä, jos se asetettaisiin yhteen pisteeseen kaavalla

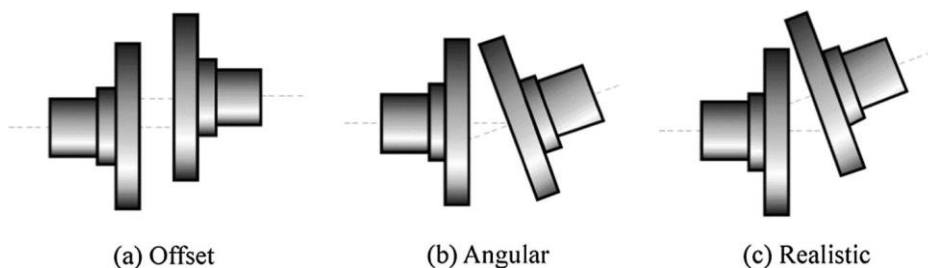
$$F = m * r * \omega^2 \quad \Rightarrow \quad m = \frac{F}{r * \omega^2} =$$

Jos sallittava säteiskuormitus on 490N, niin sallittavaksi kuormaksi saadaan yhdessä pisteessä <1,43kg. Tällaista painon tuottamaa voimaa ei kuitenkaan M10 muttereilla ja pulteilla olla käytännössä saamassa edes kuudessa kiinnityspaikassa, joten tässä ei nähdä tarpeelliseksi asettaa pieniä rajoitteita, jos käyttö rajataan muttereille ja pulteille. Kun lasketaan kuormaa muistakin kuin yhdestä kohdasta, muunnetaan voimat vektoreiksi ja resultantti on laskettavissa 4.8 kappaleessa esitettyjen laskutapojen avulla. Tietenkin jos vaihteeseen luodaan vikoja niin toimivuutta ei voida taata.

Kulmavaihteessa ei esiinny voimia, joiden tarkastelussa katsottaisiin aiheutuvan sen akselissa merkittävää taipumaa. Kulmavaihteeseen ei myöskään kohdistu mainittavia akselinsuuntaista voimia.

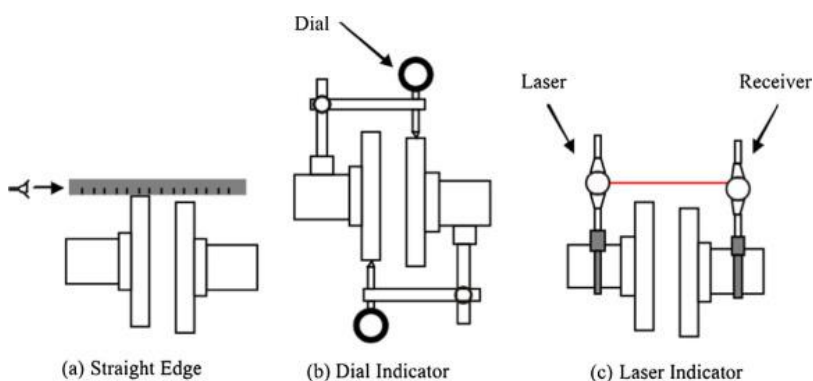
5.3 Linjaus

Akselin virheellinen linjaus on todella yleinen syy laitevikoihin. Linjausvirheet aiheuttavat laakereiden, tiivisteiden, kytkinten ja hihnojen ylimääräisen kuormituksen tai jopa hankaloittavat niiden toimintaa, josta johtuu tarve ylimääräisille energialle ja kunnossapidolle. Tyypilliset linjausvirheet ovat epäkeskeisyys, kulmavirhe ja niiden yhdistelmä. (Simm, A., Wang, Q., Huang, S., Zhao, W. 2016)



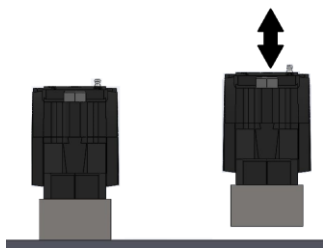
Kuva 13: Tyypilliset linjausvirheet. (Simm, A., Wang, Q., Huang, S., Zhao, W. 2016, muokattu)

Linjauksen oikeaoppinen asennuksen tarkastelu mitataan kuva 14:n tavoin tarkastelemalla ja mittaamalla niiden tasoa mm. mittakellolla (b) ja laserlinjauslaitteella (c).



Kuva 14: Linjauksen tarkastaminen. (Simm, A., Wang, Q., Huang, S., Zhao, W. 2016, muokattu)

Kuvassa 15 näkyy toimintaperiaate, kuinka saadaan luotua linjausvirhe. Laitteeseen linjausvirheiden luonti on helppoa, sillä se ei vaadi kuin simmilevyjen poiston tai lisäyksen. Jos halutaan kasvattaa vikaa niin silloin voidaan säädellä laitteiston komponenttien korkeutta pöydässä olevilla iskumuttareiden kiinnityksillä. Tällä tavoin saadaan linjattua akselin kulma, tai taso viallisesti, jonka seurauksena luodaan kuvan 13 kaltaiset viat.



Kuva 15: Toimintaperiaate, jolla voidaan luoda linjausvirhe. Yhtä, tai useampaa laakeripesän ja alustan korkeutta säädetään iskupulttikiinnityksillä ja aluslevyin.

5.4 Mekaaniset kiinnitykset

Kun linjattavan laitteen tai koneiston asennusjalat eivät ole tasaisesti tasossa kiinnitetynä voidaan puhua ilmiöstä nimeltään pehmyt jalka, tai pehmyt tassu. Tähän voi olla monta syytä, laitteessa voi olla epämuodostunut tai vahingoittunut jalka suhteessa muihin jalkoihin. Tyypillisesti syitä ovat valmistusvirheet, yleinen kuluminen, tai muut syyt, kuten asennuksesta johtuvat. (SKF:n [www sivut](http://www.skf.com))

Kuitenkin erinäisistä syistä, kuten asennusviasta, värinästä ja ulkoisista voimista johtuen kiinnitykset voivat olla tai muuttua viallisiksi. Tällä on tapana luoda omat rasiuksensa eri koneiden käytölle ja sillä voi olla suuretkin riskit riippuen laitteistosta. Toteutettuun laitteistoon on myös helppo luoda näitä vikoja, sillä se ei vaadi kuin virheellisen kiinnityksen.

Käytännössä tämänkaltaiset virheet on melko helppo luoda, sillä yksinkertaisimmillaan tämä merkitsee sitä, että tason ja asennettavan koneen tai laitteen kaikki jalat eivät kosketa tai ne eivät ole tasaisesti samalla tasolla. Yksinkertaisimmillaan tämä tarkoittaa aluslevyjen poistoa yhden jalan alta.

5.5 Laakeriviat

Laitteessa käytettiin osaksi vikaantuneita laakereita. Kolmelle eri laakerille luotiin erilaiset viat. Kuvasta 03:sta nähdään laitteen rakenne ja pidemmälle akselille asennettiin nämä vialliset laakerit. Vasemmalta oikealle akselin asennetuista laakereista nähdään Kuva 16:sta myös vasemmalta oikealle siinä järjestyksessä olevat vikatyypit. Lyhyemmässä akselissa käytettiin ehjiä laakereita.

Laakereita vahingoitettiin kolmella tapaa. Ensimmäisessä laakerissa vahingoitettiin yhtä laakerikuulaa, hioman kaltaisella kulumalla. Toisessa tehtiin viilto laakerin sisäkehään, joka näkyy kuitenkin vain osittain kuva 16:sta, sillä viilto ylittää laakerikuulien alle kokonaisesti, siten, että se ylittää yhdestä reunasta toiseen. Kolmannessa laakerissa tehtiin viilto ulkokehään. Viillot ovat laakerien pyörimissuuntaan nähden leveyssuunnassa.



Kuva 16: Laakerikuulan vahingoittaminen, sekä viilto sisä- ja ulkokehään.

Laakerivaurioita voivat aiheuttaa huono tai puutteellinen asennus, voitelu, liat, ylikuormitus, metallikosketus, joka voi johtua aikaisempien asioiden lieveilmiöistä ja muut vauriot. Laakereiden asennukseen on myös käytetty kiristysholkkia, jonka huono sovitus, liiallinen, tai liian vähäinen kiristys aiheuttavat vikaantumisia. (Messer, A. 2017)

5.6 Hammaspyörät

Laitteessa käytettiin hammaspyöräparia ja hammashihnaa. Näille on mahdollista tehdä virheellinen asennus, joka johtaa eri vikaantumisiin ja ylimääräisiin kuormituksiin laitteistossa. Kuluma hammaspyörissä ja hihnoissa on tyypillistä, sekä tämä johtaa lieveilmiöihin, jotka kasvattavat järjestelmän kuormaa. On siis tärkeää pystyä tunnistamaan tämänkaltaisia ongelmia ajoissa. Koska asennukseen on jätetty melko suuri asennusväli, voidaan hammashihnan asennuksesta tehdä tarkoituksella liian väljä, tai kireä. Akseliväli voidaan laskea kaavalla (1).

5.7 Vaihteisto

Kulmavaihteen valinnassa tärkein kriteeri oli, että sille on olemassa varaosia, sekä se on huollettavissa. Kulmavaihteeseen ja sen osiin on mahdollista tehdä eri vikaantumisia, kuten käyttää liian paljon tai vähän voitelua, aiheuttaa hampaiden kulumista, murtaa hampaita ja yleisesti ottaen tehdä viallisen asennuksen sen kokoonpanossa, jos niiden lieveilmiöitä halutaan tutkia kunnonvalvonnan kannalta.

5.8 Muut viat

Käytännössä laitteistoon voidaan tehdä myös enemmän tai vähemmän tyypillisiä vikoja ja tässä käytiin vain osa niistä. Laitteistossa on helppo esimerkiksi korvata tai vahingoittaa joustoelementtiä. Kun puhutaan vikaantumisista, käytännössä mikä tahansa osa voi vikaantua, siksi tässä ollaan rajattu ne asiat, joiden nähdään olevan keskeisiä ja tärkeitä kunnonvalvonnan kannalta, mutta kuitenkin rajaten viat mekaanisiin. Tärkeintä kuitenkin on rajata harjoittelu turvallisiin muutoksiin ja tehdä harjoittelu turvallisesti.

6 YHTEENVETO JA POHDINTA

Kunnonvalvonta on erittäin laaja ala. Tässä työssä sen käsitteet rajattiin todella suppeaan tilaan pyrkien havainnollistamaan sen osuus suunnitteluun ja toteutukseen. Tämä oli paikoin haastavaa, koska hyvin laaja alue kunnonvalvonnasta kuitenkin liittyy hyvin läheisesti tämän laitteiston toteutukseen ja suunnitteluun. Tarkoituksena on ollut tiivistää todella laaja alue pieneen osaan, jonka johdosta käydyt asiat vaikuttavat varsin suppeilta.

Käytännössä mitä pidemmällä työn toteutus on ollut, sitä enemmän ollaan siitä opittu niin teoreettisia kuin käytännön asioita, jonka johdosta olisi jälkikäteen helppo tehdä parannuksia, koska tutkimustyöstä saatava hyöty on kumulatiivista ja sitä tietoa on melko helppoa hyödyntää niin suunnittelun kuin toteutuksen kannalta.

Toteutuksesta jäi puutteelliseksi mittaukset, joiden seurauksena on epäselvää, miten onnistunut kokonaisuus on. Tässä opinnäytetyössä tutkimustyön voidaan myös katsoa jääneen osittain puutteelliseksi, koska varsinaisia tuloksia anturien mittauksista ei tähän saatu. On myös epäselvää, joutuuko moottorista siirtyvää tärinää vaimentamaan ylimääräisin keinoin.

LÄHTEET

Helsingin yliopiston www-sivut. Viitattu: 15.03.2019. <https://www.helsinki.fi/fi>

Hentinen, M., Hynnä, P., Lahti, T., Nevala, K., Vähänikkilä, A., Järviluoma, M. 2002. Värähtelyn ja melun vaimennuskeinot kulkuvälineissä ja liikkuvissa työkohteissa. Espoo Viitattu: 21.03.2019. <https://www.vtt.fi/inf/pdf/tiedotteet/2002/T2160.pdf>

Opetushallituksen www-sivut. Viitattu: 10.03.2019. <https://www.edu.fi/>

Otavan opiston www-sivut. Viitattu: 15.03.2019. <http://opinnot.internetix.fi>

Messer, A. 2017. Ultrasound for PdM: You heard it here first. Viitattu: 6.06.2019. <https://www.plantservices.com/articles/2017/pd-ultrasound-for-pdm-you-heard-it-here-first/>

Saarineva, J. 1995. Lujuusoppi Peruskurssi. Tampere:Pressus Oy

OEM www-sivut. Viitattu 12.06.2016 <https://www.oem.se/>

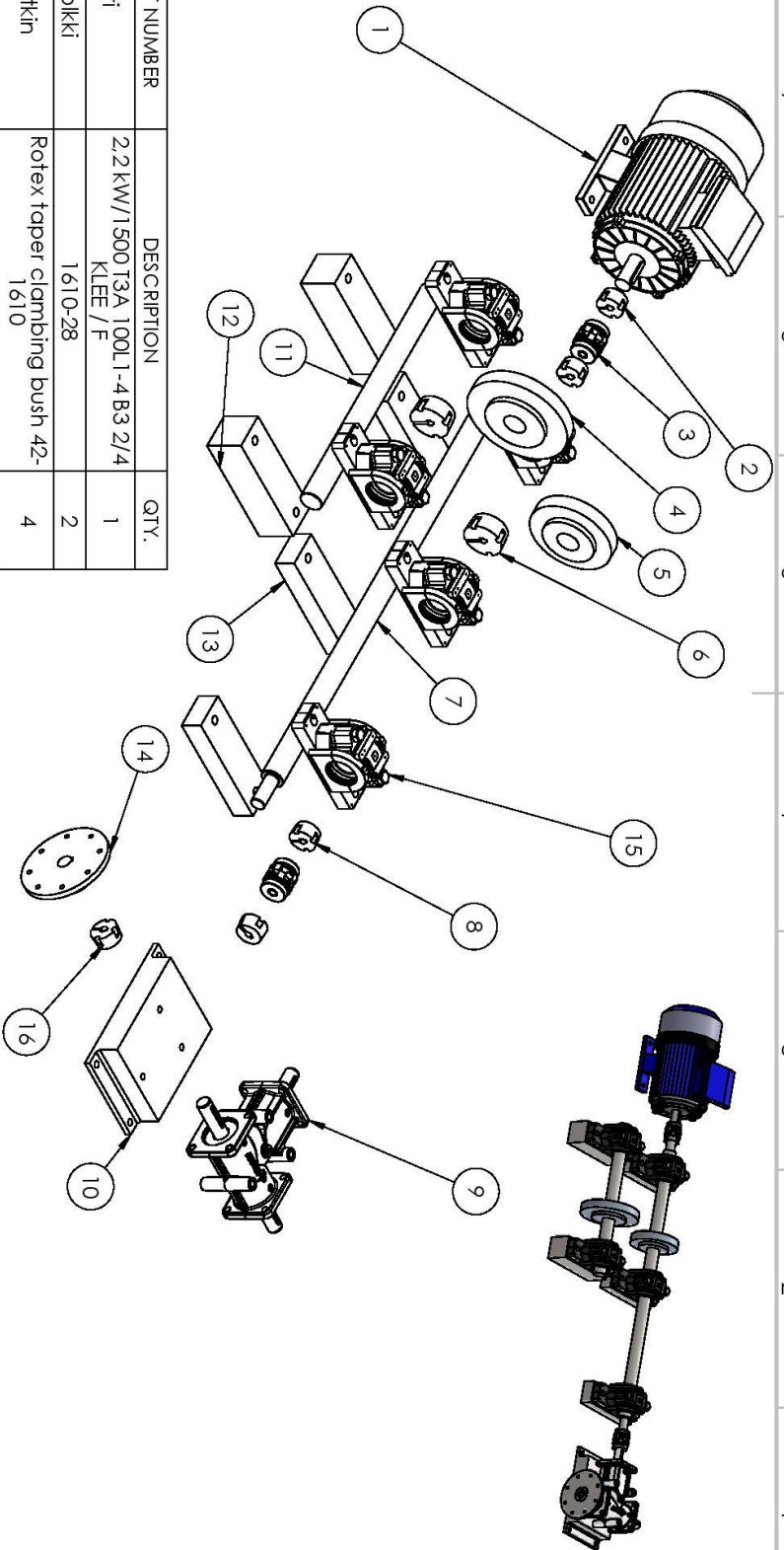
Simm, A., Wang, Q., Huang, S., Zhao, W. 2016. Laser based measurement for the monitoring of shaft misalignment. Viitattu 10.04.2019 <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0263224116001111>

SKF:n www-sivut. Viitattu: 03.04.2019. <https://www.skf.com/>

LIITELUETTELO

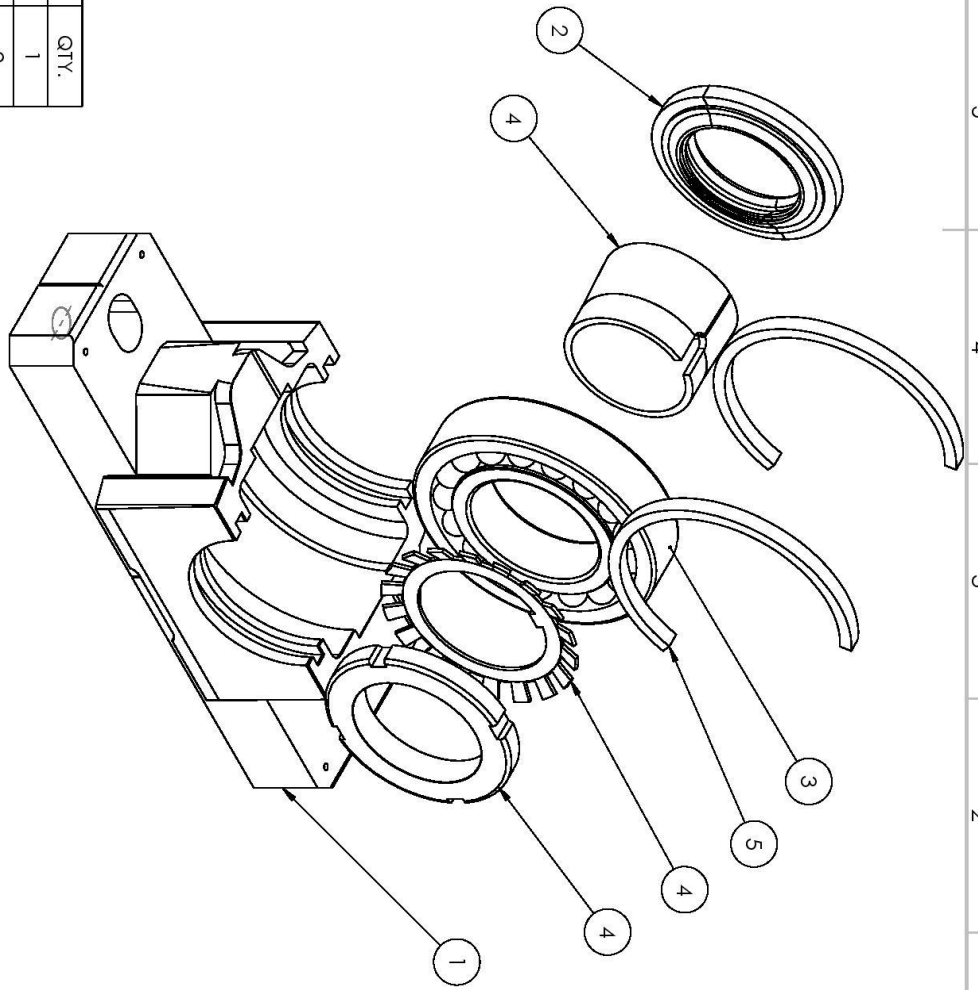
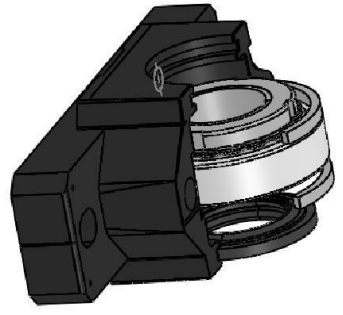
LIITE 1	Osaluettelo
LIITE 2	SE509+
LIITE 3	Aks. 500
LIITE 4	Aks. 1000
LIITE 5	LPK_A_2
LIITE 6	SNL 506-605 alusta
LIITE 7	LPK_B_2
LIITE 8	VK_2
LIITE 9	Alumiinilevyn poraukset / levy
LIITE 10	Sähkö osaluettelo
LIITE 11	Piirikaavio
LIITE 12	Kotelo
LIITE 13	Kansi
LIITE 14	Käyttöohje
LIITE 15	Ominaisaajuudet

LIITE 1



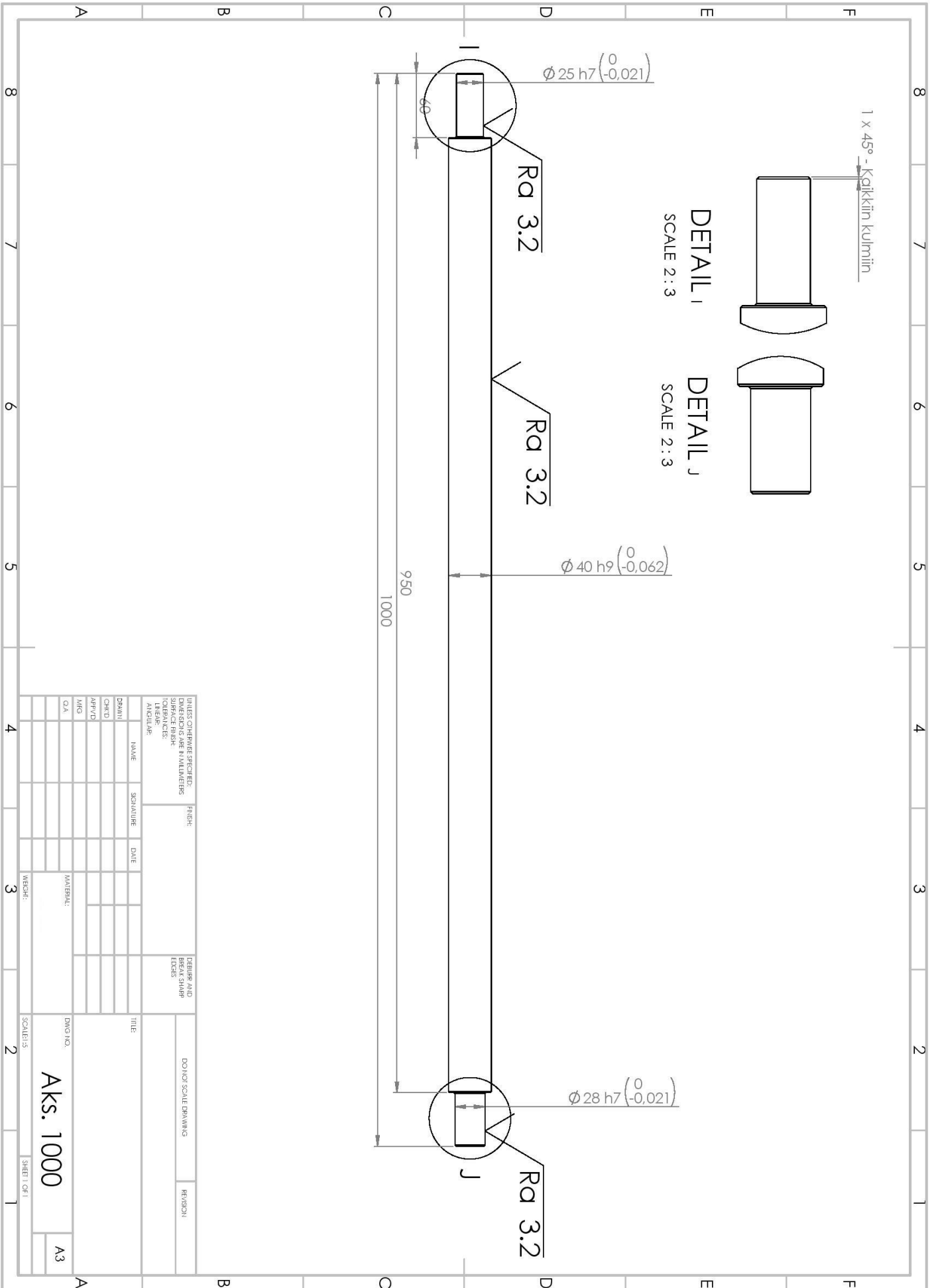
ITEM NO.	PART NUMBER	DESCRIPTION	QTY.
1	Moottori	2.2 kW/1500 T3A 100L1-4 B3 2/4 KLEE / F	1
2	Karrioholkki	1 610-28	2
3	akselikytkin	Rotex taper clamping bush 42-1 610	4
4	Hammaspyörä	72 8M 20/2012	1
5	Hammaspyörä	56 8M 20/2012	1
6	Karrioholkki	2012-40	2
7	Akseli	Aks. 1000	1
8	Karrioholkki	1 610-25	3
9	Vaihde	dz - 43 - 3FABC 1:2	1
10	Jalka, vaihde	VK_2	1
11	Akseli	Aks. 500	1
12	Jalka, laakeripesä, b	LPK_B_2	2
13	Jalka, laakeripesä, a	LPK_A_2	3
14	Laippa	Fenner BF20-2012	1
15	Laakeripesä +	Laakeripesä, tiiviste, lukkorengas, laakeri (SE509+)	5
16	Karrioholkki	2012-25	1
-	Hammasahna	11 k0 8M 20 omega	1

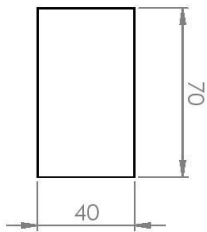
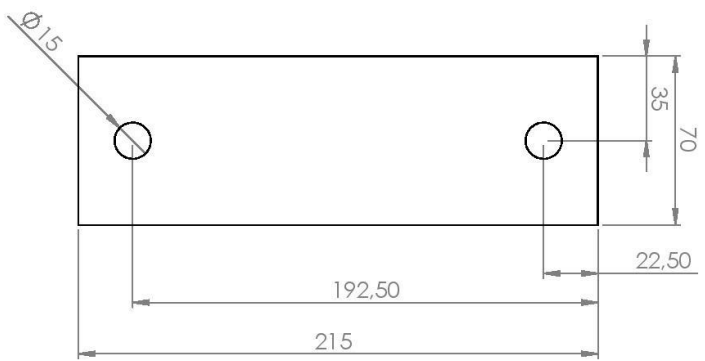
FINNISH ORIGINATE SPECIFIED DIMENSIONS ARE IN MILLIMETERS SURFACE FINISH TOLERANCES: ANGULAR:		FINISH BREAK SHARP EDGES		DO NOT SCALE DRAWINGS		REVISION	
DRAWN:	NAME:	SIGNATURE:	DATE:	TITLE:	DWG NO.	SCALE: 1:20	SHEET 1 OF 1
CHK'D:					Osaluettelo	2	1
APPROV:							
MFG:							
QA:							
MATERIAL:				WEIGHT:			



ITEM NO.	PART NUMBER	DESCRIPTION	QTY.
1	SE509	Lukkeripukki	1
2	TSNL 509 L	Tiiviste	2
3	1209 EKTN9	Lukkeri	1
4	H 209	Kiristysholkki	1
4	H 209	Kiristysholkki	1
4	H 209	Kiristysholkki	1
5	FRB 5.5/85	Lukkorengas	2

UNLESS OTHERWISE SPECIFIED:		FINISH:	DIMENSIONS AND BREAK SHOWN	
DIMENSIONS ARE IN MILLIMETERS			EDGES	
TOLERANCES:			ANGULARS	
DRAWN	NAME	SIGNATURE	DATE	TITLE
CHKD				
APPRD				
INSG				
QA				
MATERIAL:			DWG NO.	REVISION
			SE509+	
SCALE(S):			SHEET 1 OF 1	
			A3	



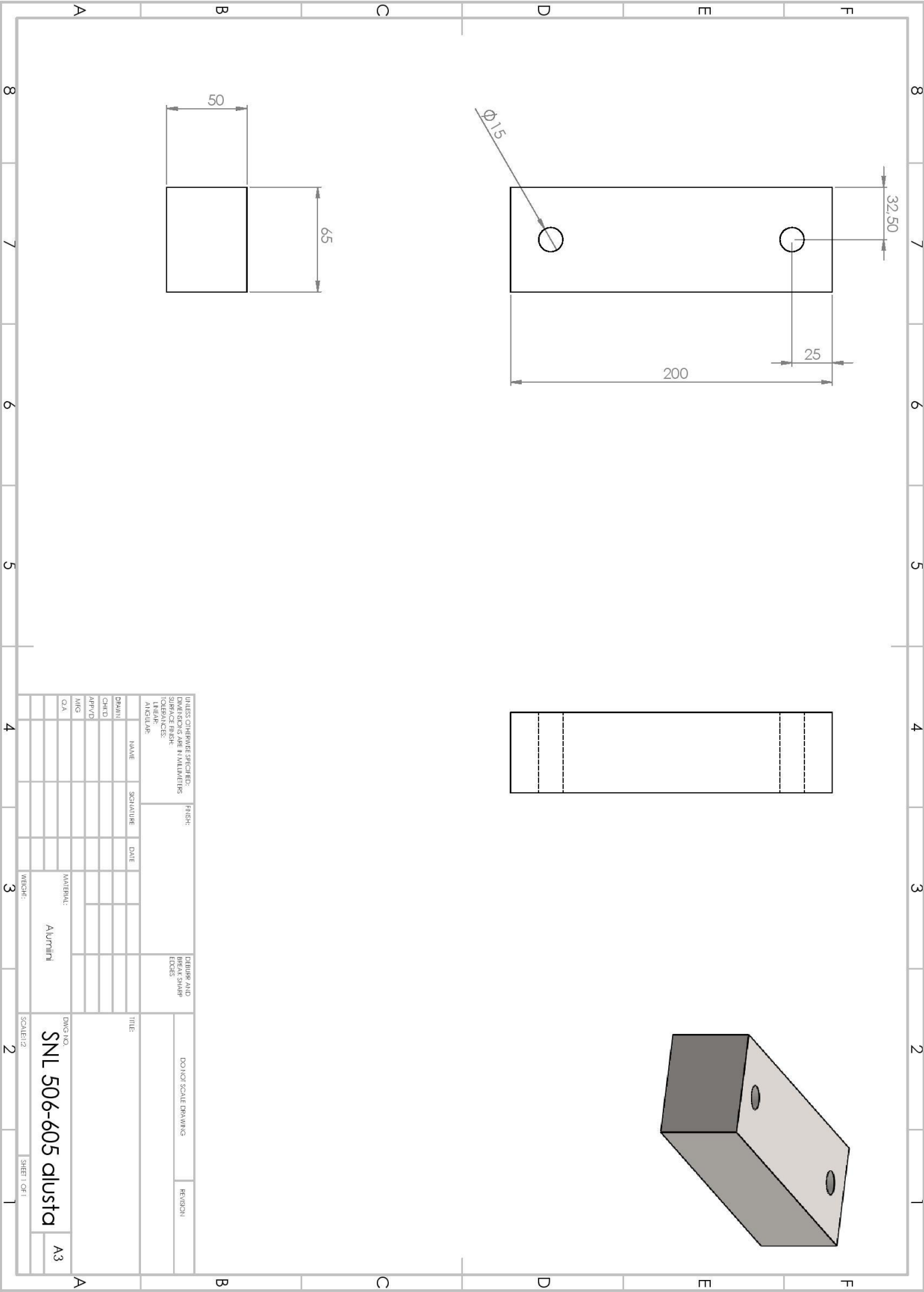
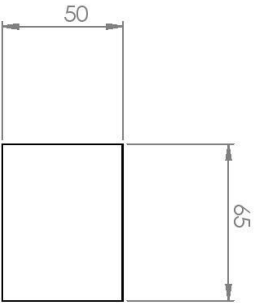
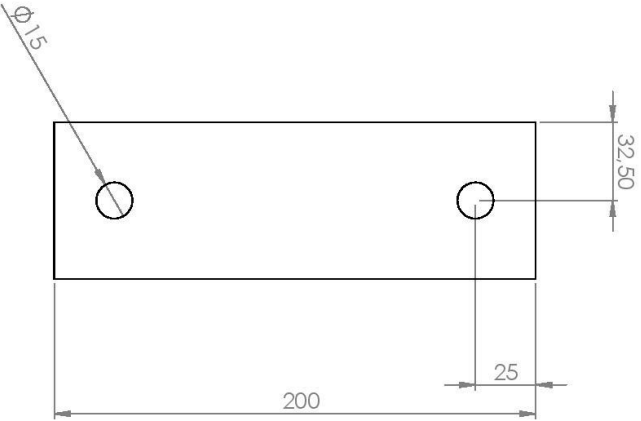
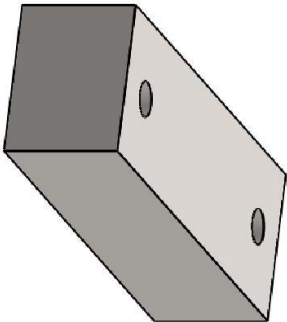


$\sqrt{\text{Ra } 6.3}$

UNITS: QUANTITIES: FINISH:		DIMENSIONS: SAME IN MILLIMETERS		TOLERANCES:		SURFACE FINISH:		CORNER AND BREAK SHARP EDGES:		DO NOT SCALE DRAWING		REVISION:	
DRAWN:		SIGNATURE:		DATE:		TITLE:		MATERIAL:		DWG NO.:		A3	
CHKD:						LPK_A_2				SCALE: 1:2		SHEET 1 OF 1	
APP'D:										WEIGHT:			
MFG:													
QA:													

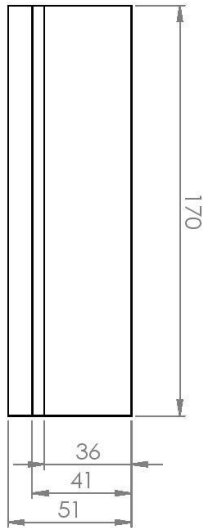
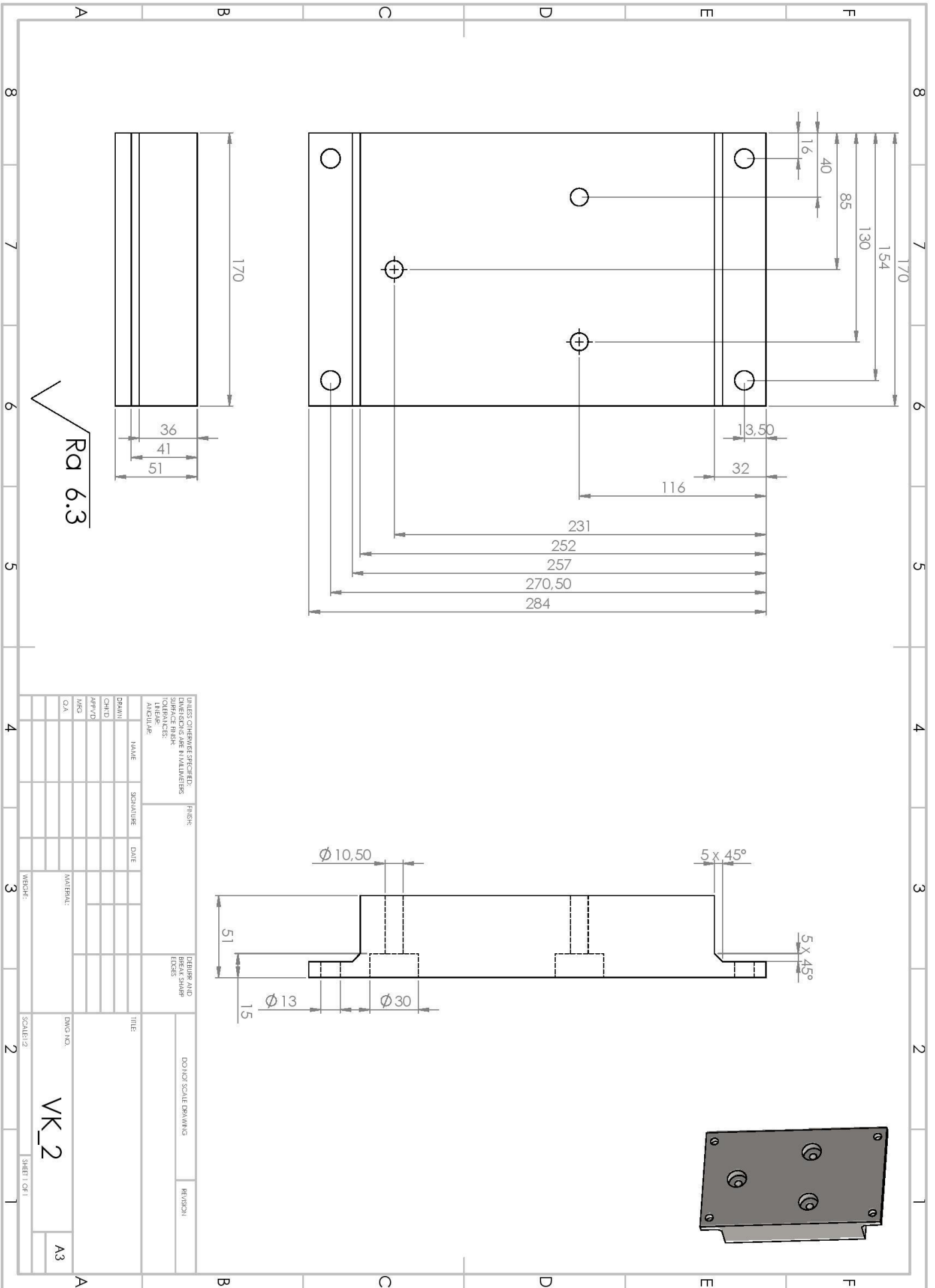
A B C D E F

8 7 6 5 4 3 2 1

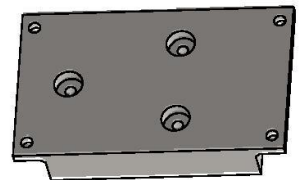
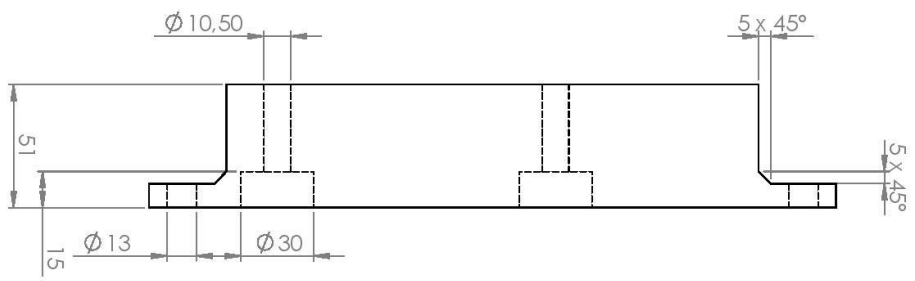


UNLESS OTHERWISE SPECIFIED: DIMENSIONS ARE IN MILLIMETERS		FINISH		DRAWING NO.	
SURFACE FINISH		REPAIR AND BREAK SHARP EDGES		TITLE	
TOLERANCES: FRACTIONAL ANGULAR				DO NOT SCALE DRAWINGS	
				REVISION	
DRAWN	NAME	SIGNATURE	DATE		
CHK'D					
APP'D					
MFG					
QA					
MATERIAL:			DWG NO.		
ALUMINUM			SNL 506-605 alusta		
WEIGHT:			SCALE: 1:2		
			SHEET 1 OF 1		
			A3		

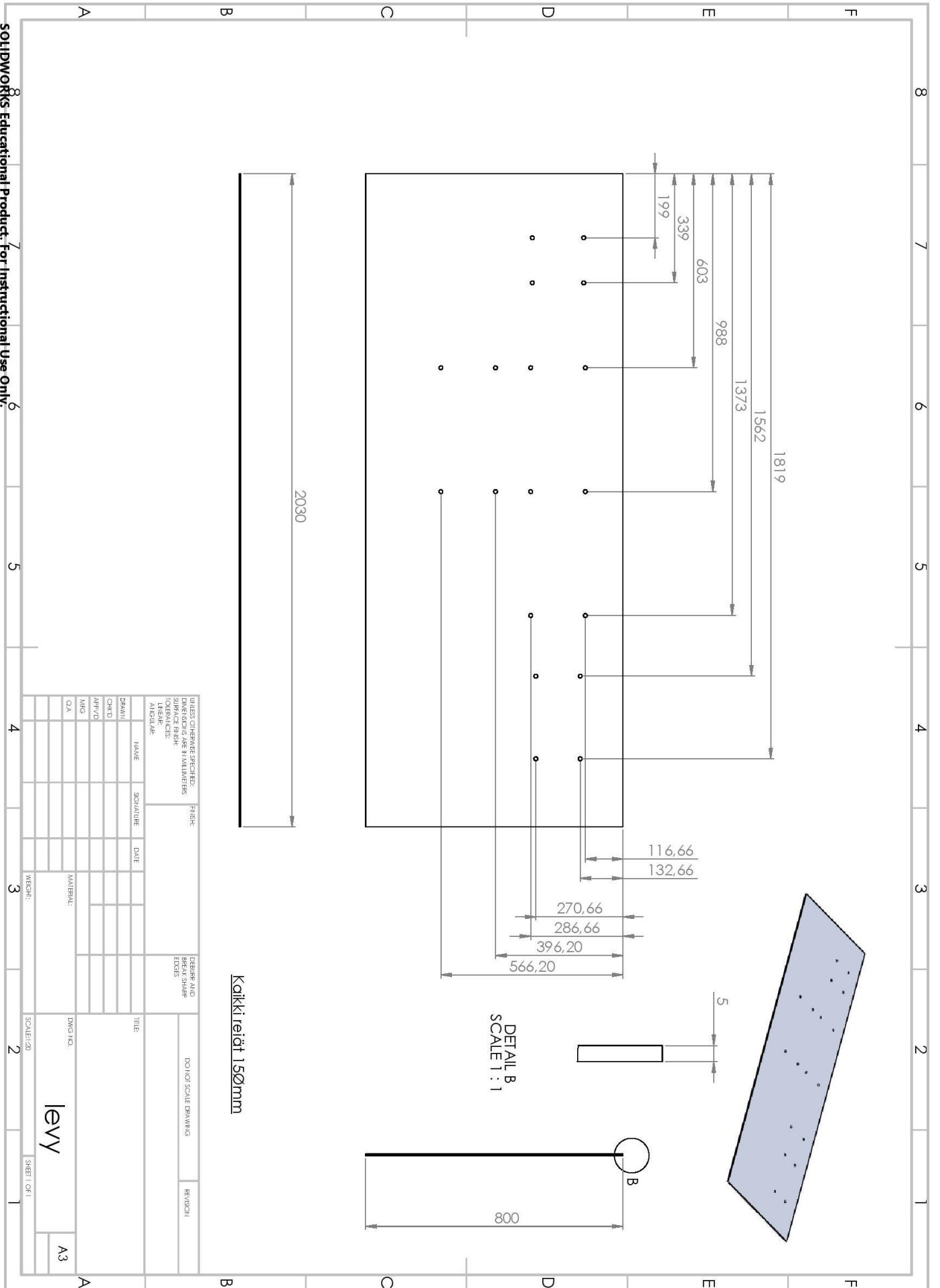
LIITE 8



√ Ra 6.3



UNITS: CHANGING EXPLODED		FINISH:		DIMS AND BREAK SHARP EDGES	
DIMENSIONS ARE IN MILLIMETERS					
TOLERANCES:					
FRACTIONS:					
DECIMALS:					
ANGLES:					
DRAWN	NAME	SIGNATURE	DATE	TITLE	SCALE: 1:2
CHKD				DO NOT SCALE DRAWING	REVISION:
APP'D					
MFG					
QA					
MATERIAL:			DWG NO. VK_2		
WEIGHT:			SHEET 1 OF 1		
			A3		



Kaikki reiät 150mm

DETAIL B
SCALE 1 : 1

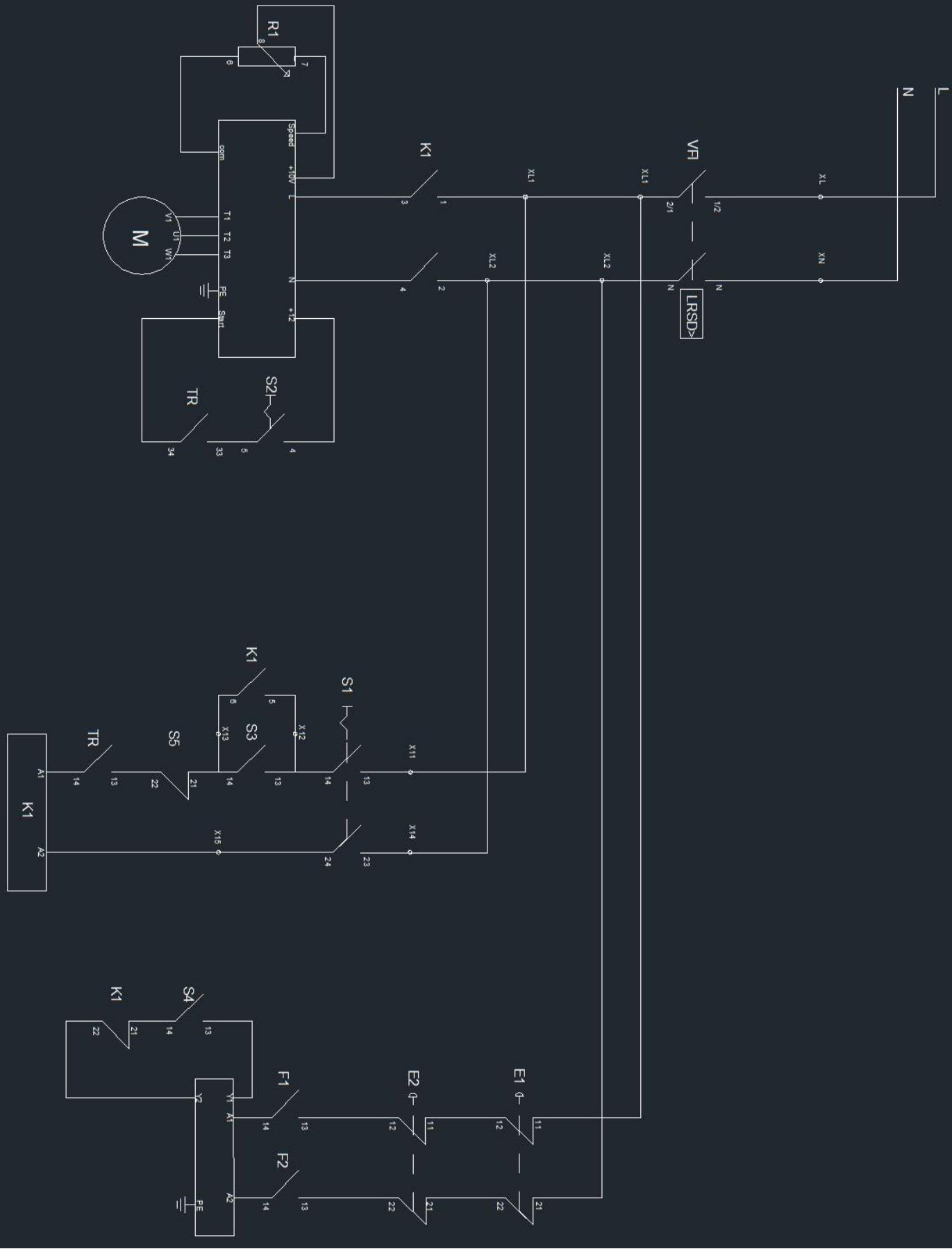
UNLESS OTHERWISE SPECIFIED:		FINISH:		DEBURR AND BREAK SHARP EDGES		DOWNSIDE SCALE DRAWING		REVISION	
DIMENSIONS ARE IN MILLIMETERS									
SURFACE FINISH:									
TOLERANCES:									
FRACTIONS:									
DECIMALS:									
ANGULARS:									
DRAWN	NAME	SIGNATURE	DATE	TITLE	DWG NO.	<div style="text-align: center; font-size: 2em; font-weight: bold;">levy</div>			
CHKD									
APPRD									
ENG									
QA									
MATERIAL:					SCALE: 1:20				
WCHRF:					SHEET 1 OF 1				
					A3				

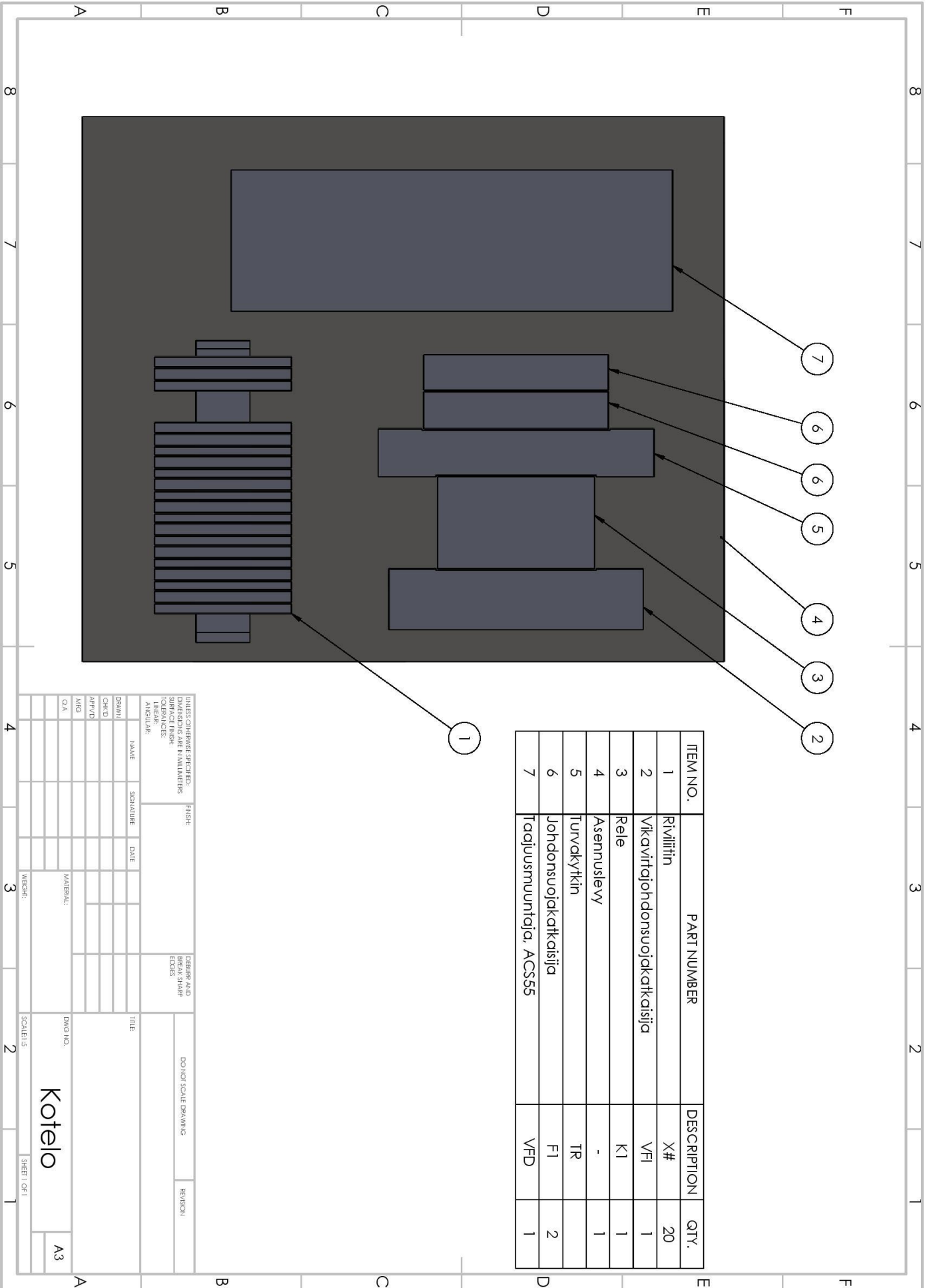
Sähkö osaluettelo

	NIMI	S-NRO
E1,E2	Hätä-seis-painike	23 215 66
F1,F2	Johdonsuojakatkaisija C2A	32 465 02
K1	Kontaktori 3-nap. 4kW, 1S,0A, 9 A	37 058 00
K1.1	Kontaktori-apukosketin, 2S,2A, Oikosulkumoottori2,2kW/1500 T3A 100L1-4 B3 2/4	37 065 11
M	KLEE / F	86 050 37
R1	Potentiometri	38 058 96
S1	Geneerinen keinupainike, punainen 16A	-
S2	Geneerinen keinupainike, musta	-
S3	Geneerinen jousipalautteinen painike, vihreä	-
S4	Geneerinen jousipalautteinen painike, musta	-
S5	Geneerinen jousipalautteinen painike, punainen	-
TR	Turvarele	35 570 28
VFD	Taajuusmuuttaja ACS55	38 041 00
VFI	Vikavirtajohdonsuojakatkaisija, C, 16 A / 30 mA	32 599 12

Riviliittimien järjestys vasemmalta oikealla:

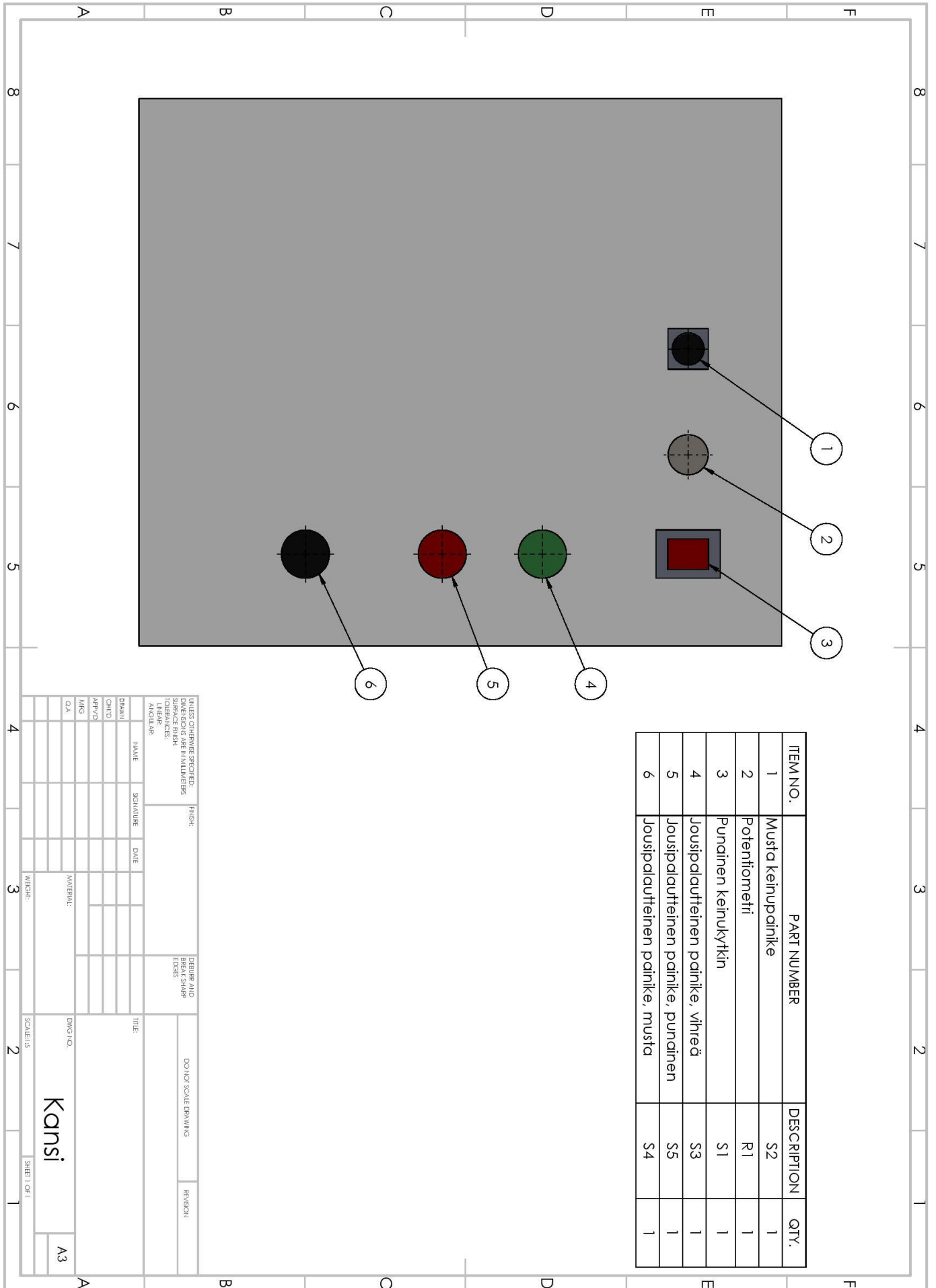
T1/U1
T2/V1
T3/W1
-
PE
PE
PE
N
N1
N1
N2
L
L1
L1
L2
11
12
13
14
15
16





ITEM NO.	PART NUMBER	DESCRIPTION	QTY.
1	Riviliitin	X#	20
2	Vikavirtajohdonsuojakatkaisija	VFI	1
3	Rele	K1	1
4	Asennuslevy	-	1
5	Turvakytkin	TR	
6	Johdonsuojakatkaisija	F1	2
7	Taajuusmuuntaja, ACS55	VFD	1

ITÄISEN OHJEKIRJAN ESITIEDOT: DIMENSIOT: KOKO, PÄIKKÄ SUURUUS: KOKO, PÄIKKÄ TOLERANSSIT: KOKO, PÄIKKÄ KÄYTTÖ: KOKO, PÄIKKÄ		FINNISH: DIMENSIONS: OVERALL, CUTOUT SIZE: OVERALL, CUTOUT TOLERANCES: OVERALL, CUTOUT USE: OVERALL, CUTOUT	REVISIONS AND REVISIONS EDCS:	DO NOT SCALE DRAWING REVISION:
NAME: _____ SIGNATURE: _____ DATE: _____	TITLE: _____			
DRAWN: _____ CHECKED: _____ APP'D: _____ MFG: _____ QA: _____	MATERIAL: _____	DWG NO.: _____	SCALE: 1:5 SHEET 1 OF 1	
<h1>Kotelo</h1>		A3		



ITEM NO.	PART NUMBER	DESCRIPTION	QTY.
1	Musta keirupainike	S2	1
2	Potentometri	R1	1
3	Punaisten keirukytin	S1	1
4	Jousipalautteen painike, vihreä	S3	1
5	Jousipalautteen painike, punainen	S5	1
6	Jousipalautteen painike, musta	S4	1

UNLESS OTHERWISE SPECIFIED:		FINISH:		DOWEL SCALE DRAWING		REVISION	
DIMENSIONS ARE IN MILLIMETERS		SURFACE FINISH:		DRAWN		DATE	
TOLERANCES:		ANGULAR:		CHECK'D		APPROV'D	
				MATERIAL:		SCALE: 1:5	
				Q.A.		DRAWN:	
						SCALE: 1:5	
						SHEET 1 OF 1	
						A3	
						Kansi	

Käyttöohje

- Käytön ja virran ollessa päällä pidettävä sellainen etäisyys, josta yltyä helposti hätä-seis-painikkeeseen, ilman kurottamista tai ilman, että käyttäjän ja hätä-seis-painikkeen välillä on minkäänlaista estettä!
- Käyttö vain hätä-seis-painikkeiden ja laitteen edestä!
- Kaikkien muutosten tekeminen virtojen ollessa päällä on kielletty!
- Suojakupua kuuluu käyttää virran ollessa päällä!
- Kytchentäboxin oltava kiinni!
- Varmista ettei laitteessa tai sen ympärillä ole mitään ylimääräistä
- Ennen virran kytkentää kuuluu tarkistaa kiinnitykset!
- Käytön lopuksi paina hätä-seis-painikkeet pohjaan!

Käyttö tapahtuu kytkentäboxin kannesta, sekä hätä-seis-painikkeiden kautta.

Ennen virran kytkemistä on tehtävät seuraavat asiat:

- Käännettävä/varmistaa mustan keinukytkimen tila 0-asentoon
- Käännettävä/varmistaa punaisen keinukytkimen tila 0-asentoon
- Potentiometri on käännettävä vastapäivään niin paljon kuin mahdollista, jotta kierrosluku saadaan nolnaan.
- Hätä-seis-painikkeet nostettava ylös

Alkuvaiheen jälkeen voidaan asettaa punainen keinukytkin 1-asentoon.

- Paina mustaa jousipalautteistapainiketta, ”RESET” nollataksesi turvakytkin. Laite ei käynnisty, jos hätä-seis-painike on aktivoitu virran ollessa päällä ja turvarelettä ei resetoida.
- Painamalla vihreää jousipalautteistapainiketta saadaan releelle ja taajuusmuuntajalle virta, joka mahdollistaa käytön.
- Painamalla musta keinukytkin 1-asentoon saat asetettua taajuusmuuntaja ohjausvirran.
- Kääntämällä potentiometriä saat asetettua nopeuden. Käytä tasaista nopeudenmuutosta.

Laitteiston lopetus tapahtuu seuraavasti:

- Aseta potentiometrin nopeus nolnaan.
- Aseta musta keinukytkin 0-asentoon
- Paina punaista jousikytkintä.
- Aseta punainen keinukytkin 0-asentoon.
- Paina kaikki hätä-seis-painikkeet pohjaan.

!Lue tämä käyttöohje huolella ja varmista että noudatat sen ohjeita!

1. 1000 -Akselin ominaistajuuudet – Ei ylimääräistä kuormaa.

Mode No.	Frequency(Rad/sec)	Frequency (Hertz)	Periods (Seconds)
1	1330.6	211.77	0.0047221
2	3647.9	580.86	0.0017224
3	7083.6	1127.4	0.00088701

2. 500 -Akselin ominaistajuuudet – Ei ylimääräistä kuormaa.

Mode No.	Frequency(Rad/sec)	Frequency (Hertz)	Periods (Seconds)
1	4278.6	680.97	0.0014685
2	11499	1830.2	0.0005464
3	19875	3163.2	0.00031614

3. Alumiinilevyn ominaistajuuudet – Ei ylimääräistä kuormaa, reunakiinnitys.

Mode No.	Frequency(Rad/sec)	Frequency (Hertz)	Periods (Seconds)
1	210.38	33.484	0.029865
2	266.32	42.386	0.023593
3	364.59	58.026	0.017234

4. Alumiinilevyn ominaistajuuudet – Reuna + pulttikohtainen kiinnitys.

Mode No.	Frequency(Rad/sec)	Frequency (Hertz)	Periods (Seconds)
1	585.88	93.246	0.010724
2	816.04	129.88	0.0076996
3	844.3	134.38	0.0074419

Tulokset saatu käyttämällä SolidWorks ohjelmaa ja simulointi työkalua.